

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**HACIA UNA RED DE TRANSMISIÓN
COMPLETAMENTE ÓPTICA**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

JOSÉ LUIS LUQUE ALARCÓN

**PROMOCIÓN
1999 – I**

**LIMA – PERÚ
2002**

Para mis queridos padres Carlos
y Marlene y mi adorada esposa
Liza.

**HACIA UNA RED DE TRANSMISIÓN
COMPLETAMENTE ÓPTICA**

SUMARIO

En la actualidad la mayoría de empresas de telecomunicaciones están experimentando un rápido crecimiento del tráfico en sus redes debido a los recientes avances de la computación multimedia y de las tecnologías de comunicación, sin embargo sus sistemas de transmisión no proveen la capacidad suficiente para manejar este aumento. Una red de transmisión completamente óptica es una propuesta importante para solucionar este inconveniente, ya que no se realiza ningún tipo de conversión electro-óptica, permitiendo manejar mayores velocidades y reducir costes.

El presente trabajo presenta las opciones de evolución de una red de transmisión actual y se enfoca en el desarrollo de una red de transmisión completamente óptica, que es la más adecuada para adaptarnos al aumento de tráfico. Explicamos la tecnología DWDM, las opciones que se tienen actualmente para la evolución de la red y finalmente nos enfocamos en el desarrollo de una red completamente óptica con sus mecanismos de protección y supervisión y el impacto del reencaminamiento a nivel óptico.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	4
INTRODUCCIÓN A LA JERARQUÍA DE RED ÓPTICA	4
1.1. Redes de Largo Alcance	5
1.2. Redes Metropolitanas	6
1.3. Redes de Acceso	7
CAPÍTULO II	9
FUNDAMENTOS DE LA MULTIPLEXACIÓN DENSA POR DIVISIÓN EN LONGITUD DE ONDA - DWDM	9
2.1. Desarrollo de la Tecnología de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	9
2.2. Diferentes Generaciones de Redes de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	10
2.3. Funciones del Sistema de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	13
2.4. Habilitando Tecnologías	15
2.5. Componentes y Operación	16
2.6. Fibras Ópticas	17
2.7. Fuentes de Luz y Detectores	22
2.8. Amplificadores Ópticos	25
2.9. Multiplexores y Demultiplexores	27

2.10. Interfaces a los Sistemas de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	33
2.11. Operación de un Transpondedor basado en el Sistema de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	35
CAPÍTULO III	37
EL SISTEMA DE MULTIPLEXACIÓN DWDM EN LAS REDES METROPOLITANAS	37
3.1 Tecnologías en el Mercado Metropolitano	37
3.2. Migración de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH) / Red Óptica Síncrona (SONET)	43
3.3. Topologías y Esquemas de Protección para los Sistemas de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda	44
CAPÍTULO IV	54
OPCIONES DE EVOLUCIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN	54
4.1. La opción de evolución por defecto	55
4.2. La opción de Red GMPLS	57
4.3. La opción de Red Completamente Óptica Independiente	61
CAPÍTULO V	66
MECANISMOS DE SUPERVISIÓN DE REDES ÓPTICAS	66
5.1. Número de portadoras	67
5.2. Potencia óptica y rizado	68
5.3. Relación portadora-ruido	68
5.4. Identificación de portadora	68

5.5. Deriva en longitud de onda	69
5.6. Emisiones espúreas	70
5.7. Potencia óptica total	70
5.8. Limitaciones del Análisis Espectral	71
CAPÍTULO VI	74
MECANISMOS DE PROTECCIÓN AUTOMÁTICA	74
6.1. Protección dedicada 1+1	76
6.2. Salida Doble	77
6.3. Selección en recepción de la portadora adecuada	77
CAPÍTULO VII	80
CREACIÓN DE RED ÓPTICA	80
7.1. Enlaces WDM punto a punto	80
7.2. Anillos metropolitanos	80
7.3. Apertura de anillos	84
7.4. Definición de los nodos concentrador y periférico	84
7.5. Interconexión de subredes	89
CAPÍTULO VIII	94
IMPACTO DEL REENCAMINAMIENTO A NIVEL ÓPTICO	94
8.1. Encontrar el camino más corto entre dos nodos	95
8.2. Analizar la viabilidad de la ruta para cada una de las portadoras	95
8.3. Activar la ruta en régimen de pruebas y medir la calidad de señal extremo a extremo	96
8.4. Puesta en servicio	96

CONCLUSIONES	97
ANEXO I : CONSIDERACIONES DE LOS ELEMENTOS DE RED	99
• Matrices de Conmutación Óptica	99
• Amplificadores ópticos	101
• Filtros de extracción e inserción	102
• Ecualizadores	103
• Canales de servicio	104
ANEXO II : GLOSARIO DE ACRÓNIMOS	106
BIBLIOGRAFÍA	108

PRÓLOGO

Las empresas operadoras de telecomunicaciones requieren una red de transmisión cuya función es interconectar sus diferentes elementos de red. Se suele distinguir, además, entre red de transmisión y redes de transporte, entendiéndose que la primera proporciona conectividad a nivel de capa física, mientras que en las segundas la conectividad incluye capas más altas. Por ejemplo en el caso de muchas operadoras la transmisión es básicamente SDH (jerarquía digital síncrona), y PDH (jerarquía digital plesiócrona) como herencia, y sobre ella se apoyan redes de transporte de circuitos, troncal ATM (modo de transferencia asíncrona) y varias redes IP (protocolo internet).

Entrando más en detalle en las redes SDH y PDH, se distingue entre su formato de multiplexación eléctrico, con sus procedimientos de agregación de tráfico y supervisión de calidad, y la transmisión por línea, que es óptica. Hasta la fecha, la transmisión óptica es funcionalmente muy simple: por una misma fibra se envían varias portadoras independientes, cada una con una longitud de onda (λ) diferente, que se generan en un

elemento de red y terminan en otro con el que están unidos directamente por fibra. Si la distancia entre los elementos es superior a cien kilómetros, aproximadamente, se insertan en la fibra a intervalos regulares amplificadores ópticos, que amplían la longitud del enlace hasta varios cientos (y miles, en cable submarino) de kilómetros. Como una extensión de estos enlaces, en algunos casos también se insertan en la fibra filtros de extracción e inserción, que permiten derivar o insertar en puntos intermedios una o varias portadoras, de longitudes de ondas fijas. A la transmisión simultánea de varias portadoras se la denomina DWDM, del término inglés *Dense Wavelength Division Multiplexing*, o multiplexación densa por división en longitud de onda.

Los rápidos avances producidos en DWDM, junto con la creciente demanda de servicios de alta velocidad y gran ancho de banda, están provocando cambios sustanciales en las arquitecturas de las redes ópticas. Así, la tecnología DWDM se está expandiendo progresivamente desde el núcleo de las redes ópticas de alta velocidad hacia las redes metropolitanas y de acceso. Y todo ello provocado por el éxito alcanzado por las soluciones DWDM de largo alcance que han permitido un aumento espectacular en la capacidad de las redes ópticas de transporte.

De hecho, se ha observado que la introducción de tecnología DWDM en las redes ópticas metropolitanas produce grandes beneficios en cuanto a coste, flexibilidad y eficiencia. Las primeras generaciones de sistemas

DWDM dependían de subsistemas eléctricos que se encargaban de realizar funciones de conmutación, gestión de conexiones, protección y gestión de prestaciones. Sin embargo, se debe destacar las ventajas adicionales que conlleva la introducción de redes ópticas transparentes en el ámbito de las redes regionales y metropolitanas. Una red óptica transparente hace referencia a una red que mantiene el tráfico en el dominio óptico, es decir, sin ningún tipo de conversión OEO (óptica-eléctrica-óptica) en ninguno de sus nodos. Estas redes también se conocen habitualmente por el nombre de redes todo ópticas (all-optical networks), y sus elementos básicos son OADMs (optical add-drop multiplexers) y OXCs (optical cross-connects) que trabajan directamente sobre los canales ópticos sin realizar ningún tipo de conversión al dominio eléctrico.

La reducción en la cantidad de conversión OEO en una red óptica representa importantes ahorros de coste y de consumo de potencia, a la vez que se facilita una evolución más rápida hacia mayores velocidades. Así pues, el impulso por la migración hacia redes ópticas transparentes se basa fundamentalmente en consideraciones económicas, viéndose favorecido por la aparición de toda una serie de nuevas tecnologías de conmutación óptica.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA JERARQUÍA DE RED ÓPTICA

La jerarquía de red óptica se ilustra en la Figura 1, donde se pueden observar los distintos segmentos o dominios de red que la conforman: redes de largo alcance, redes metropolitanas y redes de acceso.

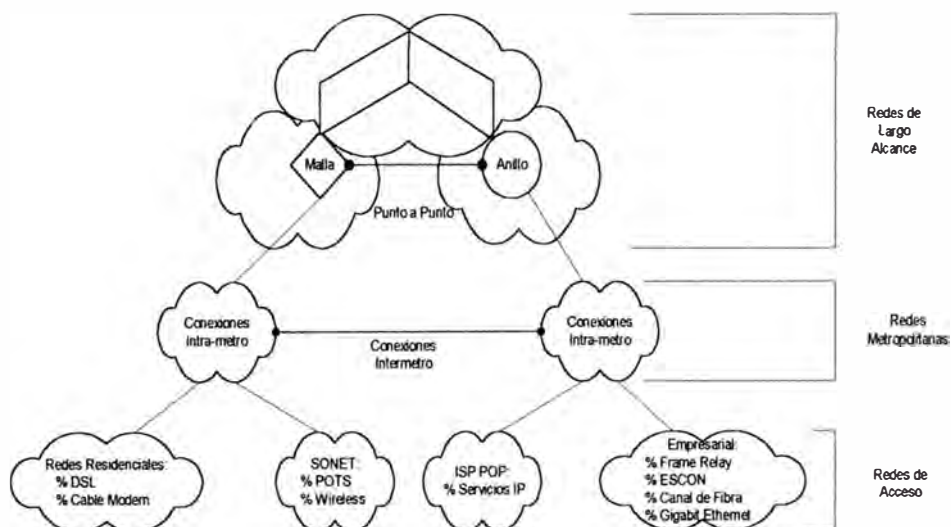


Figura 1. Jerarquía de Redes

A continuación analizaremos más en detalle las características de cada uno de estos segmentos de red.

1.1. Redes de Largo Alcance

Las redes de largo alcance pueden cubrir distancias geográficas de miles de kilómetros, enlazando entre sí las distintas redes metropolitanas y extendiendo a su vez la conectividad entre dominios regionales. Dada la gran capacidad de transporte que requieren este tipo de redes, el esquema tradicional basado en SONET/SDH tuvo que sustituirse por un despliegue de tecnología DWDM a gran escala.

Al mismo tiempo, las distancias de transmisión tan elevadas y el gran número de canales ópticos provoca la aparición de múltiples efectos no lineales y degradaciones de las señales. En muchos casos se requiere conversión optoelectrónica (OE) y regeneración electrónica 3R para mantener una calidad de señal y una tasa de errores aceptable, lo cual se encuentra enfrentado con los planteamientos de las redes ópticas transparentes. Como resultado de todo esto, las soluciones de largo alcance son muy costosas y representan inversiones estratégicas de larga duración.

Sin embargo, la mejora de las diferentes tecnologías empleadas (fibras, amplificadores ópticos, filtros y elementos compensadores de dispersión) está permitiendo incrementos notables de la capacidad de transmisión y la migración hacia arquitecturas de red multilongitud de onda con velocidades del orden de Tbit/s. Las redes de largo alcance continúan evolucionando con cada nueva generación de mejoras DWDM,

convirtiéndolas en más robustas, eficientes y económicas. Así, las redes de nueva generación serán capaces de desarrollar mecanismos flexibles de protección, conmutación y enrutamiento. Y para ello es necesario también que el escalón inferior (redes metropolitanas) sea eficiente y robusto.

1.2. Redes Metropolitanas

Las redes ópticas metropolitanas cubren distancias de cientos de kilómetros, proporcionando servicio a grandes áreas metropolitanas. Constituyen el segmento de enlace entre las redes de acceso y de largo alcance, interconectando todo un abanico de protocolos de cliente y de velocidades de canal. Las redes metropolitanas se guían por dos factores clave: los requisitos de cliente y la tecnología para satisfacer estos requisitos. Para ello, los proveedores de servicio desplegaron en su día tecnología SONET/SDH empleando topologías punto a punto y anillos de ADMs (multiplexores de extracción e inserción). Sin embargo, en la actualidad las redes metropolitanas están experimentando una rápida metamorfosis como consecuencia de los correspondientes cambios en los dominios de acceso y de largo alcance.

La explosión de capacidad producida en los enlaces de largo alcance DWDM, unido a la creciente demanda de ancho de banda IP coloca a las redes metropolitanas en una encrucijada. La infraestructura actual basada en TDM presenta problemas para conseguir la eficiencia y flexibilidad que

necesitan los clientes, en concreto limitaciones para escalar la capacidad e ineficiencia frente al tráfico de ráfagas o impredecible. Teniendo en cuenta estas cuestiones, se requiere una migración hacia una arquitectura ultraescalable y de mayor capacidad. Los proveedores de servicio necesitarán este tipo de soluciones en un mercado competitivo donde el coste, la diferenciación de servicios (QoS, calidad de servicio, y SLA, acuerdo de nivel de servicio) y la capacidad bajo demanda se convertirán en claras ventajas competitivas. En este sentido, la arquitectura basada en DWDM es la solución más económica para crear redes ópticas metropolitanas con escalabilidad de ancho de banda, flexibilidad, multitud de servicios y capacidad de gestión. En definitiva, el mercado de las redes ópticas metropolitanas plantea interesantes retos y oportunidades tanto para los vendedores de equipamiento como para los proveedores de servicio.

1.3. Redes de Acceso

Las redes de acceso se caracterizan por una gran variedad de protocolos e infraestructuras, y por lo tanto también de velocidades: DS1, DS3, OC-3, OC-12, Ethernet a 10 Mbit/s, ESCON a 200 Mbit/s, OC-48 y OC-192. Se encargan de concentrar el tráfico de un gran número de usuarios de Internet residenciales y de grandes corporaciones: empresas privadas, organismos gubernamentales, instituciones educativas, etc. Para soportar esta diversidad de clientes, las redes de acceso deben manejar un conjunto de aplicaciones basadas en multitud de protocolos. Entre los diferentes

protocolos se encuentran: IP, ATM, SONET/SDH, Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet, voz multiplexada en TDM, vídeo digital, FDDI (Fiber Distributed Data Interface, o interfase de datos distribuidos en fibra), ESCON (Enterprise System Connectivity, o conectividad de sistemas empresariales) y Fibre Channel (canal de fibra).

Este segmento de mercado ofrece oportunidades muy dinámicas e impredecibles. Estas oportunidades provienen de aplicaciones finales de usuario y tecnologías de acceso mejoradas de alta velocidad, tales como DSL (Digital Subscriber Line, o línea digital de abonado), módems de cable o servicios inalámbricos emergentes como LMDS. No obstante, está claro que el tráfico IP continuará en aumento, y este hecho representa muchos factores a tener en cuenta debido a la naturaleza asimétrica e impredecible de los perfiles de tráfico basados en Internet. En general, las redes de acceso se guían por dos cuestiones clave: diversidad de aplicaciones y flexibilidad de arquitecturas. Además, un factor clave que requieren los proveedores de servicio para el desarrollo de redes de acceso eficientes es la "transparencia". De este modo, los vendedores que proporcionen plataformas transparentes frente a múltiples servicios y que simplifiquen las redes, ganarán el mercado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE LA MULTIPLEXACIÓN DENSA POR DIVISIÓN EN LONGITUD DE ONDA - DWDM

2.1. Desarrollo de la Tecnología de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

El inicio de WDM (multiplexación por división en longitud de onda) a fines de los 80s usando dos regiones ampliamente espaciadas de longitudes de onda 1310 nm y 1550 nm (o 850 nm y 1310 nm), algunas veces llamado WDM de banda ancha se muestra en la Figura 2. Note que uno de las fibras es usada para transmitir y la otra para recibir. Este es el arreglo mas eficiente y uno de los mas encontrados en sistemas DWDM.

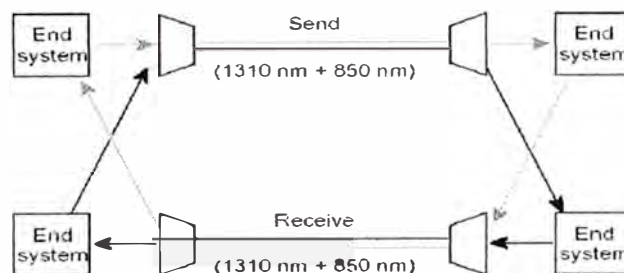


Figura 2. WDM con dos canales

2.2. Diferentes Generaciones de Redes de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

La primera generación de redes WDM surgió para aliviar el problema del agotamiento de capacidad de las redes SONET/SDH, consistía simplemente en combinar múltiples longitudes de onda en una misma fibra. El número de canales era pequeño (del orden de 16) y la protección se realizaba en las capas 2 ó 3.

La segunda generación de redes metropolitanas DWDM dobla el número de canales e introduce protección de anillo y OADMs estáticos, permitiendo que los proveedores de servicio proporcionen servicios basados en longitud de onda. Adicionalmente, las arquitecturas de red que emplean DWDM de segunda generación soportan interfaces multiservicio protegidos, tales como Gigabit Ethernet, ESCON y SONET/SDH. Si bien estas mejoras son enormes en comparación con las redes SONET/SDH convencionales, la segunda generación de redes posee limitaciones en cuanto a capacidad, coste, escalabilidad y gestión de red.

La conmutación entre múltiples anillos metropolitanos se realiza de forma centralizada y las longitudes de onda se demultiplexan antes de ser conmutadas/enrutadas de forma individual. Esto da lugar a conmutadores

con un gran número de puertos (por ejemplo, 1024 x 1024) para poder gestionar el tráfico entre anillos, resultando en costes elevados.

La mayoría de OXCs existentes en la actualidad realizan conversiones optoelectrónicas a la entrada y a la salida del conmutador debido a la falta de estándares de interconexión de longitudes de onda en entornos donde existen equipos de múltiples fabricantes. Estos conmutadores ofrecen una escalabilidad muy limitada y se convierten en una solución costosa debido a las funciones de demultiplexado, conmutación y remultiplexado que es necesario realizar. Cada conversión requiere transmisores, receptores, fibras y conectores, aumentando el tamaño del conmutador y disminuyendo su fiabilidad. Luego conforme aumentan las capacidades de las redes, sólo los conmutadores todo ópticos proporcionan una correcta protección de las inversiones.

Finalmente, las redes ópticas de tercera generación se caracterizan por ofrecer gestión dinámica de las longitudes de onda directamente en el dominio óptico, proporcionando ventajas significativas con respecto a la segunda generación de redes. Asimismo, el número de canales es mayor y existe una monitorización de prestaciones más sofisticada que se realiza sobre cada canal óptico. Por medio de láseres sintonizables y filtros, junto con tarjetas de interfaz de múltiples velocidades, se puede realizar la gestión dinámica de longitudes de onda en el dominio óptico de una forma rápida y eficiente. Sin embargo, la clave para ganar clientes consiste en su habilidad

para proporcionar nuevos servicios o cambiar la capacidad de los existentes de forma rápida.

En resumen, la tercera generación de redes DWDM proporciona conmutación de longitudes de onda directamente en el dominio óptico, teniendo en cuenta además todos los aspectos relativos a coste, escalabilidad y gestión. De este modo, en las áreas regionales y metropolitanas se proponen una serie de elementos que optimizan el funcionamiento de los anillos interconectados y de las redes en malla.

Estos elementos consisten en conmutadores WXC (wavelength cross-connects), OADMs configurables dinámicamente, transpondedores sintonizables y software de gestión avanzado para controlar la capa óptica. El WXC conmuta longitudes de onda individuales sin necesidad de demultiplexar el flujo DWDM, ahorrando gran número de costes y disminuyendo sustancialmente los requisitos de tamaño y consumo de potencia del conmutador.

En los WXC han desaparecido los de/multiplexores, los costosos transpondedores utilizados para las conversiones OEO y las fibras. Ahora cada longitud de onda puede enrutarse dinámicamente hacia cualquier nodo de cualquier enlace. De este modo, las redes pueden gestionar las diferentes rutas entre anillos interconectados o arquitecturas en malla. Adicionalmente, los mecanismos de protección de red pueden

aprovecharse de estas funcionalidades para redirigir las diferentes longitudes de onda en caso de fallo de algún nodo o enlace.

2.3. Funciones del Sistema de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

En su núcleo, DWDM involucra un pequeño número de funciones de la capa física. Estas son mostradas en la Figura 3 para el caso de cuatro canales. Cada canal óptico ocupa su propia longitud de onda.

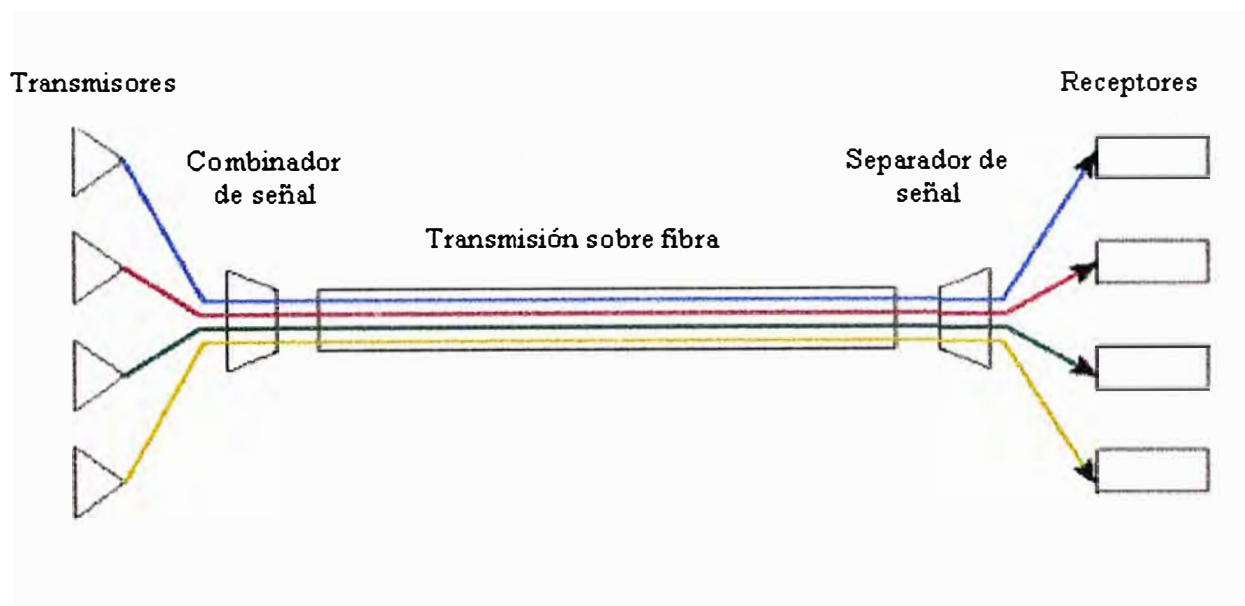


Figura 3 Diagrama funcional DWDM

El sistema realiza las siguientes principales funciones:

- Generar la señal: La fuente, un láser de estado sólido, debe proveer luz estable dentro de un específico ancho de banda angosto que transporte los datos digitales, modulados como una señal analógica.
- Combinar las señales: Los sistemas modernos DWDM emplean multiplexores para combinar las señales. Hay algunas pérdidas inherentes a la multiplexación y demultiplexación. Estas pérdidas dependen del número de canales, pero pueden ser mitigados con amplificadores ópticos, que amplifican sin realizar conversión eléctrica.
- Transmitir las señales: Los efectos del crosstalk y degradación o pérdida de la señal óptica deben ser calculados durante la transmisión en la fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados controlando variables tales como espaciamiento de canales, tolerancia de la longitud de onda y niveles de potencia del láser. Sobre un enlace de transmisión la señal puede necesitar ser amplificada ópticamente.
- Separando las señales recibidas: Al final en la recepción, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parecería ser simplemente lo contrario a la combinación de señales, es realmente mas difícil técnicamente.
- Recibiendo las señales: Las señales demultiplexadas son recibidas por un fotodetector.

Además de estas funciones, un sistema DWDM debe también ser equipado con interfases del lado del cliente para recibir la señal de entrada.

Esta función es realizada por los transpondedores. Sobre el lado DWDM están las interfases a la fibra óptica que enlaza sistemas DWDM.

2.4. Habilitando Tecnologías

Las redes ópticas, a diferencia de SONET/SDH, no confían en el procesamiento eléctrico de información. Como tal su desarrollo está mas cercanamente amarrado a lo óptico que a lo electrónico. En su forma inicial, WDM fue capaz de transportar señales sobre dos longitudes de onda ampliamente espaciadas, y para una distancia relativamente corta. Para pasar de este estado inicial, WDM necesitó mejoras en las tecnologías existentes y la invención de nuevas tecnologías. Mejoras en los filtros ópticos y láseres de banda angosta habilitaron DWDM para combinar mas de dos longitudes de onda de señal sobre una fibra.

La invención de amplificadores ópticos de ganancia plana, acoplado en línea con la fibra de transmisión para aumentar la señal óptica, incrementó dramáticamente la viabilidad de los sistemas DWDM al extender grandemente la distancia de transmisión.

Otras tecnologías que han sido importantes en el desarrollo de DWDM incluyen fibras ópticas mejoradas con poca pérdida y mejores características de transmisión óptica, EDFAs, y dispositivos tales como

enrejados Bragg de fibra usados en multiplexores de extracción e inserción óptica.

2.5. Componentes y Operación

DWDM es una tecnología núcleo en redes de transporte óptico. Los componentes esenciales de DWDM pueden ser clasificados por su lugar en el sistema como sigue:

- En el lado de transmisión, láseres con longitudes de onda estables y precisas.
- En el enlace, la fibra óptica que exhibe poca pérdida y rendimiento de transmisión en el espectro de longitud de onda, además de amplificadores ópticos de ganancia plana para aumentar la señal en grandes intervalos de tiempo.
- En el lado receptor, fotodetectores y demultiplexores ópticos usando filtros de película delgada o elementos difractivos.
- Multiplexores ópticos de inserción y extracción y componentes del crossconnect óptico.

Estos y otros componentes, con sus tecnologías se describen a continuación:

2.6. Fibras Ópticas

Hay dos categorías de fibra óptica en uso actualmente, fibras multimodo y fibras monomodo.

Multimodo, el primer tipo de fibra comercializado, tiene un núcleo mas grande que la fibra monomodo. Su nombre se deriva de que muchos modos o rayos de luz pueden ser transportados simultáneamente a través de la guía de onda. La Figura 4 muestra un ejemplo de luz transmitida en el primer tipo de fibra multimodo, llamado *step-index*.

Step-index se refiere al hecho de que hay un índice uniforme de refracción a través del núcleo; así hay un paso en el índice de refracción donde el núcleo y la interfase de revestimiento. Note que los dos modos deben viajar distancias diferentes para llegar a sus destinos. Esta disparidad entre los tiempos de llegada de los rayos de luz es llamada *dispersión modal*. Este fenómeno resulta en calidad pobre de señal en la parte de recepción y finalmente limita la distancia de transmisión. Este es el motivo por el cual las fibras multimodo no son usadas para aplicaciones de área extensa.

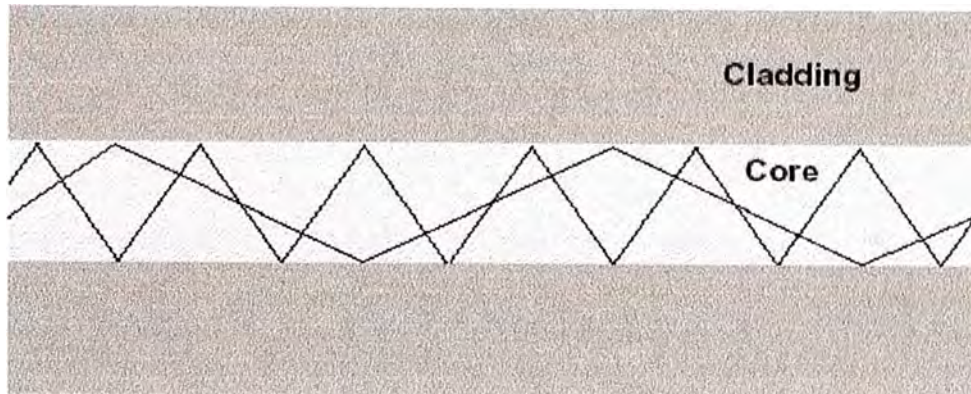


Figura 4 Luz reflejada en Fibra Multimodo step-index

Para compensar el problema de dispersión de la fibra multimodo step-index, fue inventada la fibra de índice gradual (Graded-index). Graded-index se refiere al hecho de que el índice de refracción es escalonado, este gradualmente decrece del centro del núcleo hacia fuera. La refracción más alta en el centro del núcleo disminuye la velocidad de algunos rayos de luz, permitiendo a todos los rayos alcanzar su destino al mismo tiempo y reduciendo la dispersión modal.

Monomodo, el segundo tipo de fibra, tiene un núcleo más pequeño que permite solamente un modo de luz a la vez a través del núcleo como se muestra en la Figura 5. Como resultado, la fidelidad de la señal es mejor retenida sobre grandes distancias, y la dispersión modal prácticamente no existe. Estos factores atribuyen a una capacidad de ancho de banda mas altos que las fibras multimodo. Debido a su gran capacidad de transmisión de información y baja pérdida intrínseca, las fibras monomodo son preferidas

para aplicaciones de grandes distancias y gran ancho de banda, incluido DWDM.

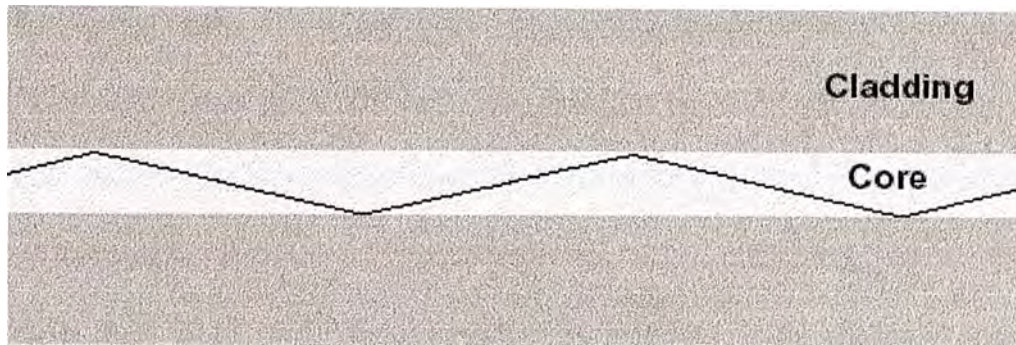


Figura 5 Luz reflejada en Fibra Monomodo

Hay cuatro ventanas dentro del espectro infrarrojo que han sido explotados para la transmisión por fibra. La primera ventana, cerca de 850 nm, fue usada casi exclusivamente para aplicaciones multimodo de rangos cortos. Fibras monomodo estándar (SM), fueron diseñados para uso en la segunda ventana, cerca de 1310 nm. Para optimizar la eficiencia de la fibra en esta ventana, la fibra fue diseñada de tal manera que la dispersión cromática sería casi cero con longitud de onda 1310 nm.

Como el uso de la fibra óptica llegó a ser más común y la necesidad de anchos de banda mas grandes y distancias incrementadas, fue explotada una tercera ventana cerca de 1550 nm, para transmisión monomodo. La tercera ventana, o banda C, ofrece dos ventajas: tiene una atenuación mas baja y su frecuencia de operación fue la misma usada para los amplificadores de erbio dopada para fibra (EDFAs). Sin embargo, sus

características de dispersión fueron severamente limitantes. Esto fue superado usando láseres de banda mas estrecha y potencias mas altas.

El tercer tipo de fibra con dispersión desplazada, esta diseñada específicamente para alcanzar las necesidades de DWDM. La ayuda de este diseño es hacer la dispersión baja en la región de 1550 nm, pero no cero. Esta estrategia introduce efectivamente una cantidad controlada de dispersión, que va en contra de efectos no lineales tales como el mezclador de cuatro ondas puede ocultar la eficiencia de los sistemas DWDM.

2.6.1. Atenuación

La atenuación en fibras ópticas es causada por factores intrínsecos, primeramente por dispersión y absorción, y por factores extrínsecos, incluidos tensión del proceso de manufactura, el ambiente y la curvatura física. La forma mas común de dispersión es la de Rayleigh, que es causada por pequeñas variaciones en la densidad del vidrio mientras se enfría. Estas variaciones son mas pequeñas que las longitudes de onda usadas y por lo tanto actúan como objetos de dispersión.

La dispersión afecta a longitudes de onda cortas mas que a las longitudes de onda largas y limita el uso de longitudes de onda debajo de 800 nm.

2.6.2. Dispersión

La dispersión es el desprendimiento de pulsos de luz mientras se desplazan a través de la fibra óptica. La dispersión resulta en la distorsión de la señal, que limita el ancho de banda de la fibra. Dos tipos generales de dispersión afectan los sistemas DWDM. Uno de estos efectos, dispersión cromática, es lineal, mientras la otra, dispersión de modo de polarización PMD, es no lineal.

- **Dispersión cromática**

La dispersión cromática ocurre porque diferentes longitudes de onda se propagan a diferentes velocidades. El efecto de dispersión cromática se incrementa como el cuadrado de la razón de bit. En las fibras monomodo la dispersión cromática tiene dos componentes, dispersión de material y dispersión de guía de onda.

- **Dispersión de modo de polarización**

La mayoría de fibras monomodo soporta dos modos de polarización perpendicular, uno vertical y otro horizontal. Debido a que estos estados de polarización no son mantenidos, ocurre una interacción entre los pulsos que resulta en un esparcimiento de la señal. La dispersión de modo de polarización (PMD) es causada por ovalamiento de la forma de la fibra como

resultado del proceso de manufactura o compresores externos. Debido a que la tensión puede variar en el tiempo, PMD a diferencia de la dispersión cromática, esta sujeta a cambios en el tiempo. PMD generalmente no es un problema a velocidades debajo de OC-192.

- **Otros efectos no lineales**

Además de PMD, hay otros efectos no lineales. Debido a que los efectos no lineales tienden a manifestarse cuando la potencia óptica es muy alta, ellos llegan a ser importantes en DWDM.

Efectos lineales tales como atenuación y dispersión pueden ser compensados, pero los efectos no lineales se acumulan. Ellos son los mecanismos limitantes fundamentales a la cantidad de información que puede ser transmitida en la fibra óptica. En DWDM el mezclador de cuatro ondas es el efecto más crítico y es causado por la naturaleza no lineal del índice de refracción de la fibra óptica.

2.7. Fuentes de Luz y Detectores

Los emisores y detectores de luz son dispositivos activos en puntos opuestos de un sistema de transmisión óptica. Las fuentes o emisores de luz son dispositivos en el lado de transmisión que convierten señales eléctricas a pulsos de luz. El proceso de esta conversión o modulación puede ser

acompañado al modular externamente una onda continua de luz o al usar un dispositivo que puede generar luz modulada directamente. Los detectores de luz realizan funciones opuestas a los emisores de luz. Ellos son dispositivos del lado receptor que convierten pulsos de luz en señales eléctricas

2.7.1. Emisores de Luz: LEDs y Lasers

La fuente de luz usada en el diseño de un sistema es una consideración importante porque este puede ser uno de los elementos mas costosos. Sus características son frecuentemente un fuerte factor limitante en el rendimiento final del enlace óptico. Los dispositivos emisores de luz usados en la transmisión óptica deben ser compactos, mono cromáticos, estables y de larga duración.

Dos tipos generales de emisores de luz son usados en transmisión óptica, diodos emisores de luz (LEDs) y diodos láser. Los LEDs son dispositivos relativamente lentos, útiles a velocidades menores a 1 Gbps y transmiten luz en un cono relativamente amplio. Estos dispositivos no costosos son usados frecuentemente en comunicaciones de fibra multimodo. Lasers semiconductores por otro lado tienen características de rendimiento mejor asociados a aplicaciones de la fibra monomodo.

Los requerimientos para lasers incluyen longitud de onda de precisa, ancho de espectro angosto, suficiente potencia y control del cambio de

frecuencia de la señal en el tiempo (chirp). Los lasers semiconductores satisfacen bien los tres primeros requerimientos. Chirp, sin embargo, puede ser afectada por los equipos usados para modular la señal.

En lasers modulados directamente, la modulación de la luz para representar la información digital, es realizada internamente. Con modulación externa, la modulación es hecha por un dispositivo externo. Cuando los lasers semiconductores están modulados directamente, chirp puede llegar a ser un factor limitante a altas velocidades (sobre 10 Gbps). Modulación externa, por otro lado, ayuda a limitar el cambio de frecuencia de la señal en el tiempo.

2.7.2. Detectores de Luz

En la parte de recepción es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda en la fibra. Debido a que los fotodetectores son por naturaleza dispositivos de banda ancha, las señales ópticas son demultiplexadas antes de alcanzar el detector.

Dos tipos de fotodetectores están ampliamente desplegados, el fotodiodo negativo intrínseco positivo (PIN) y el fotodiodo de avalancha (APD). Los fotodiodos PIN trabajan en principio similar, pero a la inversa de los LEDs. La luz es absorbida en vez de emitida y los fotones son convertidos a electrones en la relación 1:1. Los APDs son dispositivos

similares a los fotodiodos PIN, pero proveen ganancia a través de un proceso de amplificación: Un fotón actuando en el dispositivo libera muchos electrones. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluyendo bajo costo y confiabilidad, pero los APDs tienen sensibilidad y exactitud en la recepción mas alta. Sin embargo, los APDs son mas caros que los fotodiodos PIN.

2.8. Amplificadores Ópticos

Debido a la atenuación, hay límites en la distancia que un segmento de fibra puede propagar una señal con integridad antes que esta sea regenerada. Antes de la llegada de los amplificadores ópticos, tuvo que haber un repetidor para cada señal transmitida. Los amplificadores ópticos han hecho posible amplificar todas las longitudes de onda de una sola vez y sin conversión óptico-eléctrico-óptico (OEO). Además de ser usada en enlaces ópticos, los amplificadores ópticos también pueden ser usados para aumentar la potencia de la señal después de multiplexar o antes de demultiplexar, ya que ellos pueden introducir pérdidas en el sistema.

2.8.1. Amplificador de Fibra Dopada de Erblio (EDFA)

Para hacer posible el llevar grandes cargas que DWDM puede transmitir sobre grandes distancias, el EDFA fue una tecnología clave y al

mismo tiempo, este ha sido una fuerza en el desarrollo de otros elementos y tecnologías de red.

El Erbio es un elemento raro, que cuando se excita, emite luz alrededor de 1.54 micrómetros, longitud de onda de baja pérdida para fibras ópticas usadas en DWDM. El amplificador funciona de la siguiente manera; una señal débil ingresa a la fibra dopada de erbio, en donde la luz de 980 nm o 1480 nm es inyectada usando un láser de bombeo. Esta luz inyectada estimula los átomos de erbio para liberar su energía almacenada como luz adicional de 1550 nm. Mientras este proceso continúa en la fibra, la señal crece y se hace mas fuerte. La emisión espontánea en el EDFA también añade ruido a la señal; esto determina la figura de ruido de un EDFA.

Los parámetros claves de rendimiento de los amplificadores ópticos son la ganancia, cuan plana es la ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida. Los EDFAs son típicamente capaces de ganancias de 30dB o más y potencias de salida de 17 dB o más. Los parámetros decisivos para seleccionar un EDFA, sin embargo, son bajo ruido y ganancia plana. La ganancia debería ser plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras la ganancia de señal obtenida con la tecnología EDFA es inherentemente dependiente de la longitud de onda, esta puede ser corregida con filtros aplanadores. Estos filtros son frecuentemente construidos en los EDFAs modernos.

Bajo ruido es un requerimiento porque el ruido, solo con la señal, es amplificada. Debido a que este efecto es acumulativo y no puede ser filtrado, la relación señal a ruido es un factor limitante final en el número de amplificadores que pueden ser concatenados y por lo tanto en la longitud de un enlace de fibra simple. En la práctica, las señales pueden viajar hasta 120 Km. entre amplificadores. A distancias más largas (600 a 1000 Km.), la señal debe ser regenerada. Esto es porque los amplificadores ópticos solamente amplifican la señal y no realizan las funciones 3R (reshape, retime, retransmit). Los EDFAs están disponibles para la banda C y la banda L.

2.9. Multiplexores y Demultiplexores

Debido a que los sistemas DWDM envían señales desde muchas fuentes sobre una fibra simple, ellos deben incluir alguna método de combinar las señales entrantes. Esto es hecho con un multiplexor, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y los converge a un rayo. En la parte de recepción el sistema debe poder separar los componentes de la luz, de tal manera que puedan ser detectados. Los demultiplexores realizan esta función al separar el rayo recibido en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos en fibras individuales. La demultiplexación debe ser hecha antes de que la luz sea detectada, porque los fotodetectores son inherentemente dispositivos de banda ancha, que no pueden selectivamente detectar una longitud de onda sola.

Los multiplexores y demultiplexores pueden ser activos o pasivos en su diseño. Los diseños pasivos están basados en prismas, rejillas de difracción o filtros, mientras que los diseños activos combinan dispositivos pasivos con filtros sintonizables. Los principales desafíos en estos dispositivos son minimizar el cross-talk y maximizar la separación de canal. El cross-talk es una medida de que tan bien están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la habilidad para distinguir cada longitud de onda.

2.9.1. Técnicas para Multiplexación y Demultiplexación

Una forma simple de multiplexación y demultiplexación de luz, puede ser hecha usando un prisma. La Figura 6 demuestra el caso de demultiplexación. Un rayo paralelo de luz policromática impacta en la superficie de un prisma; cada componente de longitud de onda es refractada diferente. Este es el efecto *arcoiris*. En la luz de salida, cada longitud de onda es separada de la próxima por un ángulo. Un lente luego enfoca cada longitud de onda al punto donde

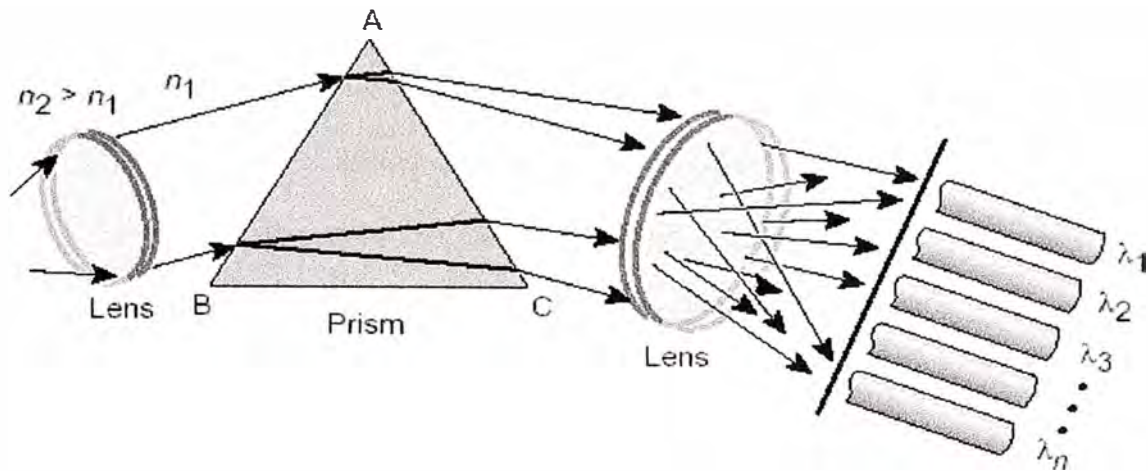


Figura 6. Demultiplexación por Refracción en Prisma

necesita ingresar a la fibra. Los mismos componentes pueden ser usados en reversa para multiplexar diferentes longitudes de onda en una fibra. Otra tecnología esta basada en los principios de difracción y de interferencia óptica. Cuando una fuente de luz policromática impacta en una rejilla de difracción, cada longitud de onda es difractada a un ángulo diferente y por lo tanto a un punto diferente en el espacio. Usando un lente, estas longitudes de onda pueden ser enfocadas sobre fibras individuales, ver Figura 7.

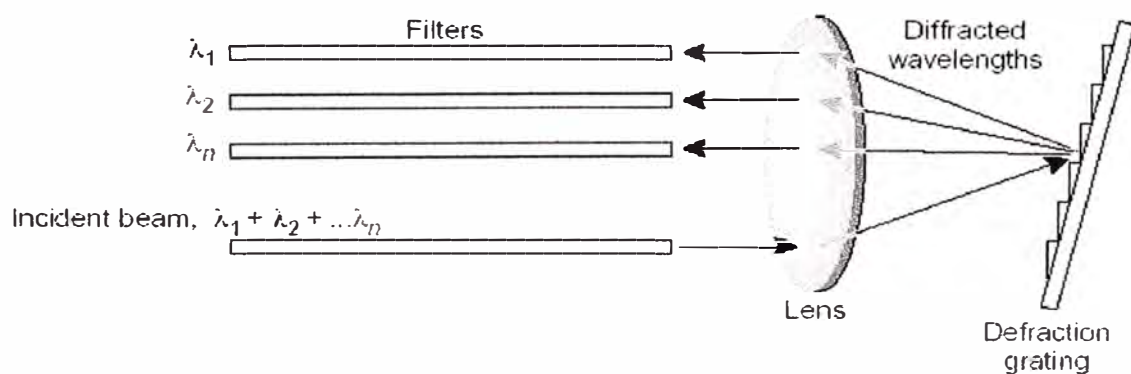


Figura 7. Rejilla de Difracción de Longitud de Onda

Rejillas de guía de onda arregladas (AWGs) también son basadas en los principios de difracción. Un dispositivo A WG, algunas veces llamado Router guía de onda óptico o Router rejilla guía de onda, consiste de un arreglo de guías de onda de canales curvos con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes (ver Figura 8). Las guías de onda son conectadas a cavidades en la entrada y salida. Cuando la luz ingresa a la cavidad de entrada, es difractada e ingresa al arreglo de guía de onda. Allí la diferencia de longitud óptica de cada guía de onda introduce retardos de fase en la cavidad de salida, donde un arreglo de fibras es acoplado. El proceso resulta en diferentes longitudes de onda teniendo interferencias máximas en diferentes ubicaciones, que corresponden a los puertos de salida.

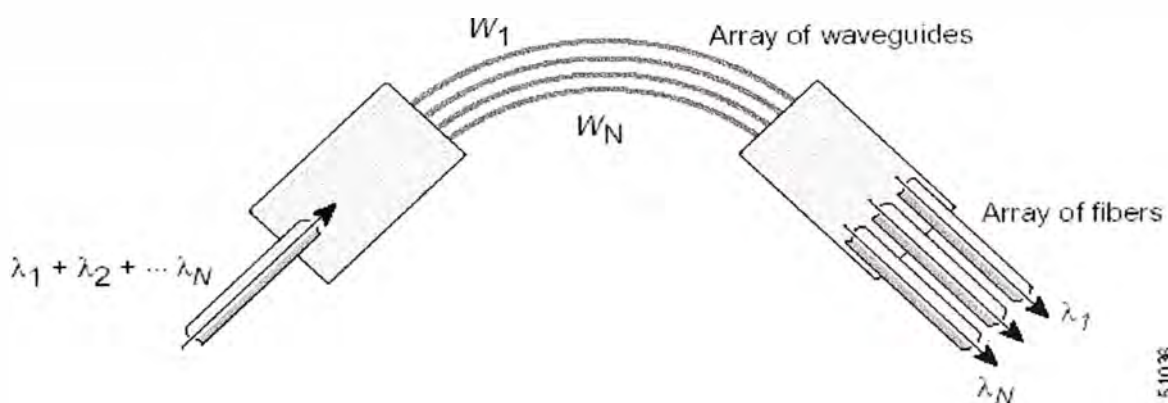


Figura 8. Rejilla de Guía de Onda Arreglada

Una tecnología diferente utiliza filtros de interferencia en dispositivos llamados *filtros de película delgada* o *filtros de interferencia multicapa*. Al posicionar los filtros, consistentes de películas delgadas, en el camino

óptico, las longitudes de onda pueden ser ordenados (demultiplexados). La propiedad de cada filtro es tal que transmite una longitud de onda, mientras refleja otras. Al colocar en cascada estos dispositivos, muchas longitudes de onda pueden ser demultiplexadas.

De estos diseños, el AWG y los filtros de interferencia de película delgada están ganando importancia. Los filtros ofrecen buena estabilidad y aislamiento entre canales a un costo moderado, pero con una gran pérdida de inserción. Los AWGs son dependientes de la polarización (que puede ser compensado) y exhiben una respuesta espectral plana y baja pérdida de inserción. Un inconveniente potencial es que ellos son sensitivos a la temperatura, por lo que no son prácticos en todos los ambientes. Su gran ventaja es que ellos pueden ser diseñados para realizar operaciones de multiplexación y demultiplexación simultáneamente. Los AWGs son también mejores para cuentas de canales grandes, donde los filtros de película delgada son imprácticos.

2.9.2. Multiplexores Ópticos de Inserción y Extracción

Entre los puntos de multiplexación y demultiplexación en un sistema DWDM, como en la Figura 9, hay un área en que las longitudes de onda múltiples existen. Es deseable frecuentemente poder remover o insertar una o más longitudes de onda en un punto a lo largo de este tramo. Un multiplexor óptico de inserción y extracción (OADM) realiza esta función. En

vez de combinar o separar todas las longitudes de onda, el OADM puede remover mientras otras están pasando. Los OADMs son una parte importante en la meta de las redes completamente ópticas.

Los OADMs son similares en muchos aspectos a los ADM SONET, excepto que solamente las longitudes de ondas ópticas son insertadas y removidas, y no se realiza conversión optoelectrónica de la señal.

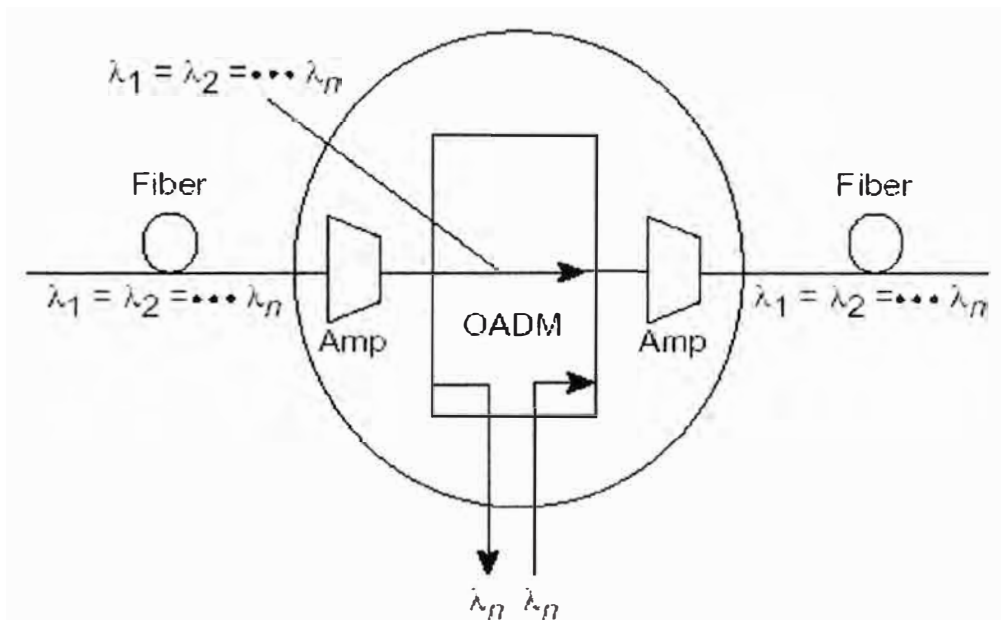


Figura 9. Extrayendo e Insertando Longitudes de Onda

Hay dos tipos generales de OADMs. La primera generación es un dispositivo fijo que es configurado físicamente para remover longitudes de onda predeterminadas, mientras inserta otras. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente que longitudes de onda son insertadas y removidas.

Los filtros de película delgada han aparecido como la tecnología para los OADMs en los actuales sistemas DWDM metropolitanos, debido a su bajo costo y estabilidad. Para la reciente segunda generación de OADMs, otras tecnologías, tales como rejillas de fibra sintonizables y circuladores llegaran a ser importantes.

2.10. Interfaces a los Sistemas de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

La mayoría de sistemas DWDM soportan interfaces ópticas de corto alcance SONET /SDH estándar a los que algún dispositivo SDH/SONET de cliente puede adjuntar. En los actuales sistemas WDM de largo alcance, es mas frecuente una interfase OC-48c/STM-16c operando en la longitud de onda de 1310 nm. Además otras interfases importantes en las áreas metropolitanas y las redes de acceso son comúnmente soportadas: Ethernet (incluyendo Fast Ethernet y Gigabit Ethernet), ESCON, Sysplex Timer y Sysplex Coupling Facility Links y Canal de Fibra. El nuevo estándar 10 Gigabit Ethernet es soportado usando un alcance muy corto (VSR) interfase OC-192 sobre fibra multimodo entre los equipos 10 Gigabit Ethernet y los equipos DWDM.

En el lado del cliente pueden estar los terminales SONET/SDH o ADMs, switches ATM o Routers. Al convertir las señales ópticas de entrada en las precisas longitudes de onda ITU-estándar para ser multiplexadas, los

transpondedores son actualmente un punto determinante de los sistemas DWDM.

Dentro del sistema DWDM un transpondedor (ver Figura 10) convierte la señal óptica del cliente a una señal eléctrica y realiza las funciones 3R. Esta señal eléctrica es luego usada para manejar el láser WDM. Cada transpondedor dentro del sistema convierte las señales de sus clientes a una longitud de onda ligeramente diferente. Las longitudes de onda de todos los transpondedores en el sistema son luego multiplexados ópticamente. En la dirección de recepción del sistema DWDM, el proceso inverso se lleva a cabo. Las longitudes de onda individuales son filtradas de la fibra multiplexada y alimentan a transpondedores individuales, que convierten la señal a eléctrica y manejan una interfase estándar hacia el cliente.

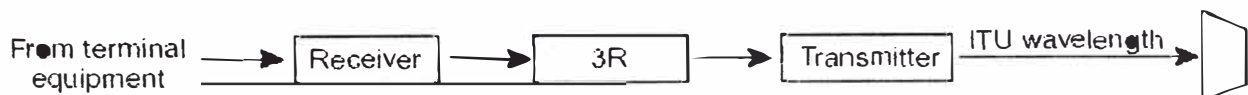


Figura 10. Funciones del Transpondedor

Diseños futuros incluyen interfases pasivas, que aceptan luz ITU-compliant, directamente de un switch o router atachado con una interfase óptica.

2.11. Operación de un Transpondedor basado en el Sistema de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

La Figura 11 muestra la operación end-to-end de un sistema DWDM unidireccional.

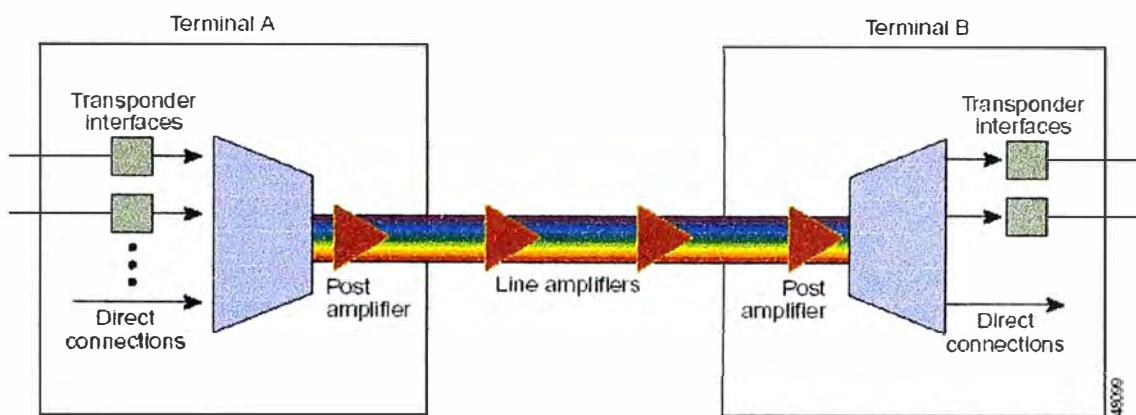


Figura 11. Anatomía de un sistema DWDM

Los siguientes pasos describen el sistema mostrado en la Figura 11:

1. El transpondedor acepta la entrada en la forma de un láser monomodo o multimodo estándar. La entrada puede provenir de diferentes medios físicos y diferentes protocolos y tipos de tráfico.
2. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM.
3. Las longitudes de onda DWDM del transpondedor son multiplexadas en señales ópticas simples y lanzados en la fibra. El sistema puede también

incluir la habilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor; tales señales pueden provenir de un nodo satelital por ejemplo.

4. Un post amplificador aumenta la fuerza de la señal óptica, mientras deja el sistema (opcional).
5. Los amplificadores ópticos son usados a lo largo del tramo de la fibra como se necesiten (opcional).
6. Un pre amplificador aumenta la señal, antes de que ingrese al sistema (opcional).
7. La señal de entrada es demultiplexada en longitudes de onda DWDM individuales.
8. Las longitudes e onda DWDM individuales son mapeadas al tipo de salida requerido (por ejemplo, OC-48 para fibra monomodo) y enviadas a través del transpondedor.

CAPÍTULO III

EL SISTEMA DE MULTIPLEXACIÓN DWDM EN LAS REDES METROPOLITANAS

Las grandes distancias que han sido posibles por los avances en las tecnologías tales como los amplificadores ópticos, los compensadores de dispersión y los nuevos tipos de fibra, resultó en el despliegue inicial de la tecnología DWDM en las redes de largo alcance transoceánicas y terrestres. Cuando estas tecnologías llegaron a ser comercialmente viables en el mercado de largo alcance, fue el próximo paso lógico para desplegarlos en las áreas metropolitanas y eventualmente en las redes de acceso, usando arquitecturas híbridas de fibra y medio coaxial.

3.1 Tecnologías en el Mercado Metropolitano

Numerosas tecnologías para el transporte y encapsulación de información han sido sustentadas en el mercado metropolitano. Una característica de estas redes, es que ellas son llamadas para soportar una variedad de nuevos y viejos tipos de tráfico y velocidades. Sobre todo hay

una tendencia en usar una capa óptica común para transportar información digital.

3.1.1. Red Óptica Síncrona (SONET) - Jerarquía Digital Síncrona (SDH)

SONET/SDH ha sido la base para las MANs en la última década, sirviendo como la capa de transporte fundamental para redes basadas en circuitos conmutados (TDM) y la mayoría de redes de datos. Mientras SONET/SDH ha evolucionado hacia una tecnología muy flexible, aún se mantiene relativamente caro de implementar. Deficiencias inherentes en adaptar los servicios de datos a la jerarquía de voz optimizada y una jerarquía de multiplexación inflexible lo mantienen problemático. Pero más importantes son las limitaciones en los escalamientos de capacidad; OC-768 puede ser el límite práctico de SONET/SDH y la insensibilidad a tráfico IP por ráfagas hace cualquier tecnología basada en TDM una elección pobre para el futuro.

3.1.2. Modo de Transferencia Asíncrona (ATM)

Muchos proveedores de servicio favorecen a ATM porque este puede encapsular diferentes protocolos y tipos de tráfico en un formato común para transmisión sobre una infraestructura SONET o SDH. Mientras tanto el mundo de las redes de datos, que está orientada a IP, favorece paquetes sobre SONET (POS), que obvia la costosa capa intermedia ATM. Avances

en IP, combinados con la capacidad de escalamiento de gigabit a multigigabit routers, hace posible avizorar una red basada en IP que encaja para transportar principalmente tráfico de datos y en segundo lugar voz.

Sin embargo ATM permanece fuerte en el área metropolitana y puede acomodar interfases de más alta velocidad y proveer servicios de circuitos virtuales, mientras ofrece capacidades de manejo de tráfico. De esta manera los dispositivos de borde ATM son comúnmente usados para terminar tráfico, incluido VoIP, DSL y Frame Relay.

3.1.3. Gigabit Ethernet

Gigabit Ethernet (GE) es una tecnología probada de fácil migración e integración a la tecnología Ethernet tradicional. Es relativamente barato comparado a otras tecnologías que ofrecen la misma velocidad de transmisión, pero no provee calidad de servicio (QoS) o tolerancia a fallos. Cuando se le confina a topologías punto a punto, las colisiones ni el acceso múltiple son de preocupación, resultando en un uso más efectivo del ancho de banda total. Debido a que las capas físicas ópticas pueden soportar distancias mas grandes que los tradicionales cables categoría 5, Gigabit Ethernet sobre fibra puede ser extendido sobre el dominio de área amplia usando DWDM.

Los últimos avances en la tecnología Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, están siendo dirigidos por la necesidad de interconectar LANs Ethernet que operan a 10, 100 o 1000 Mbps. Diez Gigabit Ethernet puede ser usado para agregar enlaces de acceso mas lentos, en el núcleo de las redes y para los accesos WAN. Usando lasers seriales de 1550 nm, son posibles distancias de 40 a 80 km con 10 Gigabit Ethernet sobre una fibra monomodo estándar. Con tal tecnología, los proveedores de servicio pueden construir redes Ethernet simples sobre fibra oscura, sin SONET o ATM y proveyendo servicios de alta velocidad 10/100/1000 Mbps, a un muy bajo costo. Además una interfase de corto alcance OC-192 puede ser usado para conectar 10 Gigabit Ethernet al equipamiento DWDM sobre fibra multimodo.

Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología probada, adaptable, confiable y nada complicada. Las implementaciones son estándares e interoperables, y el costo es mucho mas bajo que SONET o ATM. Las ventajas de Ethernet es su potencial emergente para servir como una solución escalable y punto a punto.

3.1.4. Protocolo Internet (IP)

Al migrar los servicios de circuitos conmutados a las redes IP y al crecer la información, las redes deben desarrollarse para acomodar el tráfico. Sin embargo IP debe llegar a ser tan complejo como ATM para reemplazar su funcionalidad. Así IP y ATM son candidatos para ser

transportados directamente sobre ATM. En cualquier caso el resultado es una infraestructura de red simplificada, bajo costo debido a los pocos elementos de red y a menos fibra, interfases abiertas, flexibilidad incrementada y estabilidad. La pregunta es, en que formato viajará IP sobre una red óptica: IP sobre ATM sobre SONET, IP sobre SONET, o IP sobre Gigabit Ethernet o 10 Gigabit Ethernet.

3.1.5. Canal de Fibra

Canal de fibra es una tecnología de enlace de datos predominante, usado en redes de área de almacenamiento, es el reemplazo económico para el protocolo SCSI, como una interfase de alta velocidad, para aplicaciones tales como backup, recovery y mirroring de información. Las interfases de canal de fibra están disponibles actualmente a 100 MBps y en el futuro cercano a 200 MBps.

Los canales de fibra vienen sin las limitaciones de las distancias muy cortas del SCSI; esto evita las restricciones de terminación del SCSI, debido a que cada nodo actúa como un repetidor óptico. Los canales de fibra pueden ser implementados en topología punto a punto, lazo arbitrario o mesh usando un switch. El canal de fibra, como otros protocolos, puede ser llevado directamente sobre la capa óptica usando DWDM.

3.1.6. Interfase de Datos Distribuidos sobre Fibra (FDDI)

FDDI es en este punto una tecnología de herencia, ha sido reemplazada por tecnologías mas avanzadas. Aunque FDI es capaz de escalar a áreas metropolitanas, también es una tecnología de medio compartido con una capacidad relativamente baja para los actuales estándares. Esta limitación ha causado que sea reemplazado por Gigabit Ethernet o ATM, aunque este es un protocolo que puede ser transportado transparentemente sobre la capa óptica usando DWDM.

3.1.7 Soporte para Tráfico de Herencia

A pesar del crecimiento desproporcionado del tráfico de datos versus voz, el tráfico de herencia no desaparecerá repentinamente. Las redes deben soportar diversas conexiones de baja velocidad, además de conexiones de alta velocidad. Así DWDM debe ser complementado por multiplexación eléctrica (TDM/FDM) para asegurar el uso eficiente de las ondas de luz. Al mismo tiempo, el tráfico de herencia debe ser aumentado con el transporte de información de alta capacidad, sin impactar el transporte IP.

Para los ISPs, la situación es diferente: Todo su tráfico es IP, los ISPs necesitan una construcción rápida de redes y propiciar los paquetes sobre luz o Gigabit Ethernet, en lugar de ATM sobre SONET.

3.2. Migración de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH) / Red Óptica Síncrona (SONET)

Como una tecnología de transporte, SONET es un protocolo “agnóstico” que puede transportar todo tipo de tráfico, mientras provee interoperabilidad, esquemas de protección, manejo de redes y soporte para jerarquía TDM. Aunque SONET puede continuar siendo la interfase estándar y una buena elección de protocolo de transporte en el futuro predecible, su actualización es cara.

Usando DWDM para incrementar la capacidad de las fibras que se tienen, mientras se preserva la infraestructura SONET, ofrece una alternativa a las costosas actualizaciones SONET. La migración de SONET a DWDM puede ser de hecho la aplicación mas importante en términos cercanos. En general esta migración empieza al reemplazar los backbones con DWDM y luego moverse hacia los bordes de la red.

En un escenario común, el ancho de banda en un anillo SONET puede ser incrementado enormemente al reemplazar el ADM SONET con los equipos DWDM.

En un segundo tipo de escenario, DWDM puede ser usado para remover una clase completa de equipos, los ADMs SONET. Este cambio,

que puede constituir una segunda fase de la migración SONET, permite a los ruteadores y otros dispositivos saltar los equipos SONET e interconectar directamente a DWDM, mientras se simplifica el tráfico de IP/ATM/SONET a POS y a eventualmente IP directamente sobre la capa óptica. En esta fase de migración, los sitios de los usuarios son atendidos por los OADMs en lugar de los ADMs SONET. De esta manera los anillos DWDM y las redes tipo mesh pueden eliminar el costo incrementado y la complejidad de introducir mas elementos SONET en la red para alcanzar la demanda. La ventaja aquí para los carriers es la habilidad para ofrecer servicios independientes de la velocidad, liberándolos de los frames DS1/DS3/OC-n. Tal esquema permitiría también a los accesos LAN de las empresas ser extendidas hacia las MAN o WAN sin una infraestructura SONET.

Una futura ventaja en migrar de SONET a la capa óptica, es que la protección y la restauración llega a ser menos susceptible a fallas de los componentes electrónicos.

3.3. Topologías y Esquemas de Protección para los Sistemas de Multiplexación Densa por División en Longitud de Onda

Las arquitecturas de red son basadas en muchos factores, incluyendo tipos de aplicación y protocolos, distancias, patrones de uso y acceso y topologías de red heredadas. En el mercado metropolitano por ejemplo, las

topologías punto a punto pueden ser usadas para conectar ubicaciones de empresas, las topologías anillo para interconectar oficinas y para acceso residencial, y las topologías malla pueden ser usadas para interconectar POPs y conexiones a redes de largo alcance. En efecto, la capa óptica debe ser capaz de soportar muchas topologías y debido a los desarrollos impredecibles en esta área, estas topologías deben ser flexibles.

Actualmente, las principales topologías desplegadas son las topologías punto a punto y anillo.

3.3.1. Topologías Punto a Punto

Las topologías punto a punto pueden ser implementadas con o sin OADM. Estas redes están caracterizadas por canales de muy alta velocidad (10 a 40 Gbps), alta integridad y confiabilidad de señal, y restauración rápida de camino. En redes de largo alcance, la distancia entre transmisor y receptor pueden ser varios cientos de kilómetros y el número de amplificadores requeridos entre puntos finales es típicamente menos de 10. En las redes MAN, los amplificadores no son frecuentemente necesarios.

La protección en las topologías punto a punto pueden ser de dos maneras. En equipos de primera generación, la redundancia es a nivel de sistema. Los enlaces paralelos conectan sistemas redundantes en cualquier punto terminal. La conmutación en caso de falla es responsabilidad del

equipo del cliente (un conmutador o un router por ejemplo), mientras que los sistemas DWDM por si mismo solo proveen capacidad.

En los equipos de segunda generación, la redundancia es a nivel de tarjeta. Los enlaces paralelos conectan sistemas simples en cualquier punto terminal que contienen transpondedores, multiplexores y CPUs redundantes. En este caso la protección ha migrado al equipo DWDM, con las decisiones de conmutación bajo control local. Un tipo de implementación por ejemplo usa un esquema de protección 1+1 basado en SONET APS (Automatic Protection Switching).

3.3.2. Topologías Anillo

Los anillos son las arquitecturas mas comunes encontradas en áreas metropolitanas. El anillo de fibra puede contener tan pocos como cuatro canales de longitudes de onda, y típicamente menos modos que canales. La tasa de bit esta en el rango de 622 Mbps hasta 10 Gbps por canal.

Las configuraciones de anillo pueden ser desplegadas con uno o más sistemas DWDM, pueden tener un hub y uno o más nodos OADM o satélites. En el hub el tráfico originado es terminado y manejado y la conectividad con otras redes es establecido. En los nodos OADM, uno o más longitudes de onda es eliminada e insertada, mientras que los otros pasan en forma transparente. De esta manera, las arquitecturas de anillos permiten

a los nodos sobre el anillo proveer acceso a los elementos de red tales como routers, switches o servidores añadiendo o eliminando canales de longitudes de onda en el dominio óptico. Sin embargo, con el aumento del número de OADMs, la señal está sujeta a pérdidas y se requiere amplificación.

Las redes candidatas para la aplicación DWDM en las áreas metropolitanas están frecuentemente basadas en estructuras de anillo SONET con protección de fibra 1+1. Así los esquemas de protección tales como Anillo Conmutado de Camino Unidireccional (UPSR) o Anillo Conmutado de Línea Bidireccional (BLSR) puede ser reusada para las implementaciones DWDM. La Figura 12. muestra un esquema UPSR con dos fibras. Aquí los nodos y el hub envían sobre dos anillos, pero la misma fibra está normalmente siendo usada por todos los equipos para recibir la señal, de aquí el nombre unidireccional. Si la fibra que está trabajando fallara, el equipo receptor conmuta al otro par. Aunque esto provee redundancia total para el camino, el reuso del ancho de banda no es posible, ya que la fibra redundante debe estar siempre lista para transportar el tráfico. Este esquema es comúnmente usado en redes de acceso.

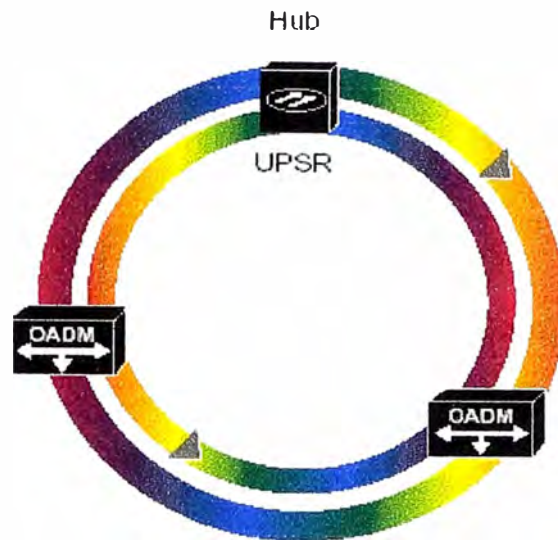


Figura 12. Protección UPSR sobre un anillo DWDM

Otros esquemas de protección tal como Anillo Conmutado de Línea Bidireccional (BLSR), permite al tráfico viajar desde el nodo transmisor hasta el nodo receptor por la ruta mas directa. Debido a esto, BLSR es preferido para el núcleo de las redes SONET, especialmente cuando esta implementado con cuatro fibras, que ofrecen redundancia completa.

3.3.3. Topologías Malla

Las arquitecturas mallas son el futuro de las redes ópticas. Mientras las redes evolucionan, las arquitecturas anillo y punto a punto aún tendrán lugar, pero las mallas serán las topologías mas robustas. Este desarrollo será habilitado por la introducción de crossconnects ópticos configurables y conmutadores que en algunos casos reemplazarán y en otros casos suplirán a los dispositivos DWDM fijos.

Desde el punto de vista de diseño, hay un camino de evolución gratificante disponible de la topología punto a punto a la malla. Al empezar con los enlaces punto a punto, equipados con nodos OADM en la salida para flexibilidad, y posteriormente interconectándolos, las redes pueden evolucionar a una malla sin un rediseño completo. Adicionalmente, las topologías mallas y anillo pueden ser unidas por enlaces punto a punto, como se aprecia en la Figura 13.

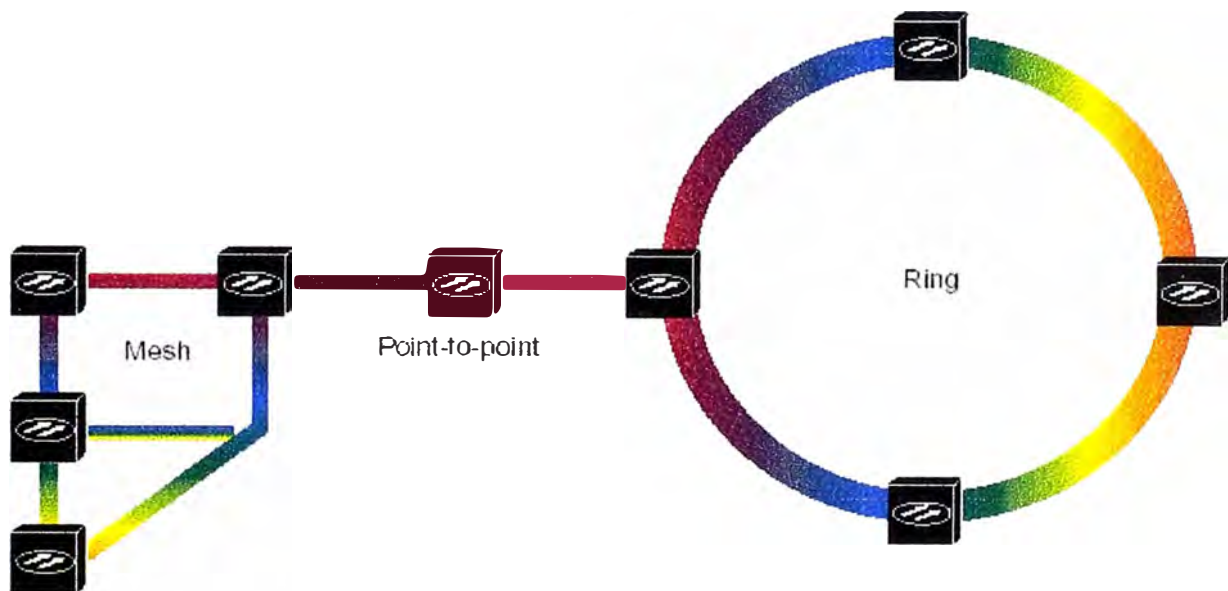


Figura 13. Topologías Malla y Anillo unidas con enlace Punto a Punto

Las redes malla DWDM, consistentes de nodos todo ópticos interconectados, requerirán la próxima generación de protección. Donde los esquemas de protección previas confiaban en la redundancia del sistema, las tarjetas, el nivel de fibra, la redundancia migrará ahora al nivel de longitud de onda. Esto significa entre otras cosas que un canal de información puede cambiar longitudes de onda mientras hace su recorrido a

través de la red, debido al enrutamiento o a la conmutación en longitud de onda en caso de falla. Esta situación es análoga al de un circuito virtual a través de una nube ATM, que puede experimentar cambios en su VPI / VCI (Identificador de camino virtual / Identificador de canal virtual) en los puntos de conmutación. En las redes ópticas, este concepto es algunas veces llamado un *camino de luz*.

Las redes malla requerirán por lo tanto de un alto grado de inteligencia para desempeñar las funciones de protección y manejo de ancho de banda, incluyendo conmutación de fibra y longitud de onda. Los beneficios en flexibilidad y eficiencia, sin embargo son potencialmente grandes. El uso de fibra, que puede ser bajo en soluciones anillo debido al requerimiento de protección de fibras en cada anillo, puede ser mejorado en un diseño malla. La protección y restauración puede basarse en los caminos compartidos, de aquí que requiere menos pares de fibras para la misma cantidad de tráfico y no desperdiciar longitudes de onda no usadas.

Anteriormente se han comentado las ventajas que conllevan las redes ópticas transparentes basadas en tecnología DWDM. A continuación analizaremos las implicaciones que tiene su implantación en el entorno de las redes metropolitanas, relegando las funcionalidades eléctricas a los extremos de la red. No obstante, se debe matizar antes que las conversiones OEO siguen siendo necesarias para realizar ciertas funcionalidades de red que de otro modo resultarían complejas, como por

ejemplo la regeneración 3R (reamplification + reshaping + retiming) de las señales ópticas o la conversión de longitud de onda.

Precisamente para desplazar la funcionalidad eléctrica a los extremos de la red y al mismo tiempo minimizar la cantidad de conversiones OEO requeridas en el núcleo, los proveedores de servicio suelen emplear dos posibles esquemas: (a) arquitectura basada en "islas" geográficas de transparencia o (b) gestión inteligente del canal óptico extremo a extremo. La primera de las posibilidades consiste en crear islas o dominios de transparencia en el interior de la red donde no se requiere regeneración 3R debido a las cortas distancias que recorren las señales ópticas. De este modo, los nodos situados en el interior de una de estas islas no será necesario que implementen conversión OEO. En cambio, las longitudes de onda transportadas entre dos de estas islas requerirán regeneración 3R y posiblemente conmutadores eléctricos o láseres sintonizables en el caso de realizar conversión de longitud de onda.

Otra posibilidad se presenta cuando la conversión OEO se realiza basándose en el trayecto que sigue cada uno de los canales ópticos, los cuales se gestionan individualmente. La conversión OEO puede añadirse a los nodos según las necesidades, y las longitudes de onda pueden enrutarse por enlaces diferentes en función de sus limitaciones de transmisión. Las ventajas que proporciona este esquema a los proveedores de servicio son: minimización del número de transceptores desplegados, reducción del

tamaño de los conmutadores eléctricos, en caso de ser necesarios, y gestión más flexible del crecimiento de la red.

En la Figura 14 se representa la configuración de los enlaces DWDM actuales de forma esquemática. Tal como se muestra, la frontera entre la red de transporte y un enlace de la red de transmisión óptica está definida por un elemento denominado transpondedor. En el sentido de entrada al enlace, la interfaz proveniente de la red de transporte suele ser óptica de corto alcance, a una longitud de onda indeterminada y con una pureza espectral baja.

En el transpondedor la señal de esta interfaz se fotodetecta y regenera eléctricamente, y a continuación la señal resultante se utiliza para modular un transmisor óptico que emite a una longitud de onda específica. La salida de este transpondedor se multiplexa con la de otros, en otras longitudes de onda, y el múltiplex resultante se amplifica e inyecta en la fibra del enlace.

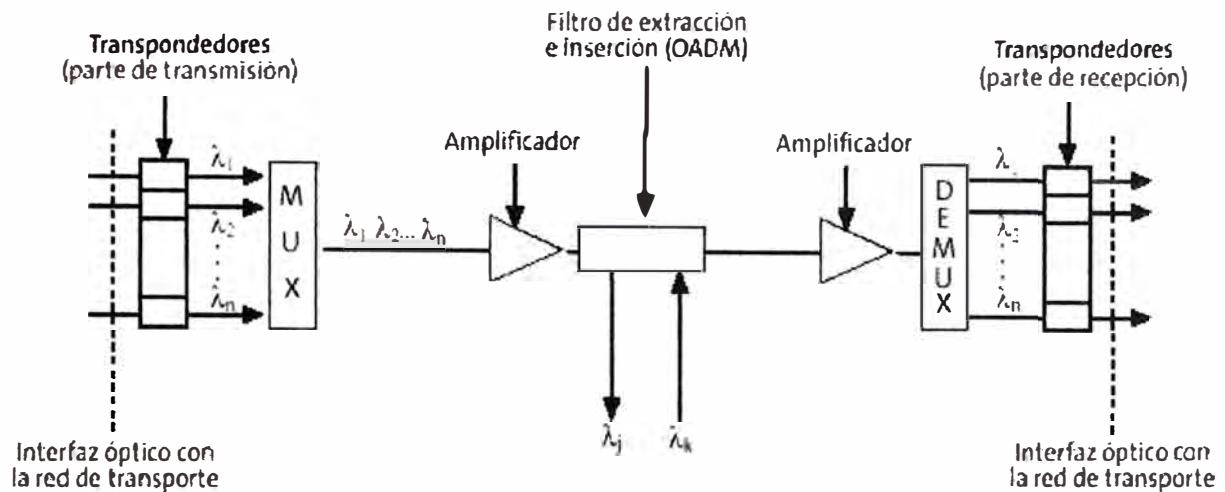


Figura 14 Enlaces DWDM actuales

En el sentido de salida del enlace, el funcionamiento es similar. El conjunto de longitudes de onda que llegan de la planta se demultiplexan, y cada una de ellas se lleva directamente a la interfaz de la red de transporte. Opcionalmente, el transpondedor incorpora un receptor óptico que fotodetecta y regenera la señal de línea, y a continuación remodula un láser de características genéricas. La salida de este láser, no seleccionado en longitud de onda, se lleva finalmente al elemento terminal de la red de transporte.

CAPÍTULO IV

OPCIONES DE EVOLUCIÓN DE LA RED DE TRANSMISIÓN

Una vez presentado la introducción a las jerarquías de redes ópticas, los fundamentos de DWDM y el esquema de un enlace de la red de transmisión actual y su interfaz con la red de transporte, se pretende exponer sus posibles opciones de evolución en función de los indicadores, o tendencias, que se observan en el mercado y en el entorno tecnológico de las telecomunicaciones. De todos ellos, se puede destacar los siguientes:

- La demanda de ancho de banda crece, y continuará creciendo, sobre todo para tráfico de tipo IP. A su vez, se prevé el despliegue de nuevas redes de transporte IP con interfaces de multiplexación eléctrica de tipo Gigabit Ethernet o de paquetes sobre SDH (POS, *packet over SDH*).
- La demanda de capacidad viene acompañada por la aparición en el mercado de sistemas de transmisión que permiten multiplexar un mayor número de portadoras ópticas, en breve plazo hasta 160. Asimismo, y aunque en menor medida, va aumentando la velocidad máxima posible de modulación por portadora (de 2,5 a 10 Gbit/s).

- Están comenzando a aparecer dispositivos que permiten el reencaminamiento de señales ópticas a nivel de portadora, principalmente filtros de extracción e inserción sintonizables y matrices de conmutación. Asimismo, se van perfeccionando elementos ópticos, tales como amplificadores, ecualizadores, compensadores de dispersión, etc.

En base a estos indicadores, se identifican tres opciones de evolución:

- *Evolución por defecto*, continuación de la red actual sin cambiar su filosofía.
- *Red GMPLS*, o integración de la transmisión óptica con la capa IP.
- *Red completamente óptica independiente*.

4.1. La opción de evolución por defecto

Consiste en dejar que la red de transmisión continúe creciendo a trozos, en función de las necesidades del momento. En este caso no se puede hablar de una red de transmisión, sino de un conjunto de enlaces ópticos independientes entre sí, que se van estableciendo para interconectar elementos de las redes de transporte. En el momento actual los elementos de red son básicamente *crossconnect* y ADM del tipo SDH.

Un caso particularmente atractivo de evolución por defecto es el conocido como IP sobre DWDM, que se muestra de forma esquemática en la Figura 15. En este escenario la red de transporte es IP, y todos sus elementos de red son *routers*. Dependiendo de su capacidad de direccionamiento de tráfico, reciben el nombre de *Terarouters* (TSR) o *Gigarouters* (GSR) para capacidades de terabit (10^{12} bit) o gigabit (10^9 bit) por segundo, respectivamente. Asimismo, los *routers* se conectan entre sí mediante enlaces ópticos DWDM punto a punto.

En la red IP sobre DWDM, que se representa en la Figura 5.1, no se realiza ningún proceso a nivel óptico: el reencaminamiento y las funciones de protección se llevan a cabo a nivel eléctrico en los *routers*. Por consiguiente, si un paquete o conjunto de paquetes IP tienen que atravesar n *routers*, sufren n procesos de conversión optoelectrónica.

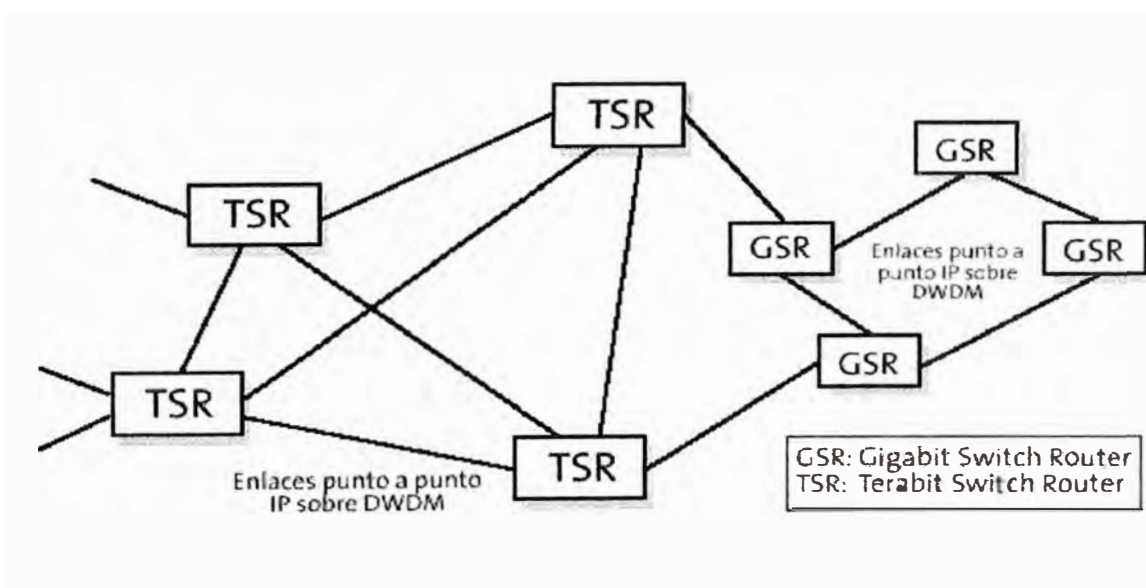


Figura 15. Ejemplo de evolución por defecto, red IP sobre DWDM

La evolución por defecto tiene el atractivo de su simplicidad de planificación: no existe una capa óptica. Por contra, a medida que el tráfico en las rutas sube a centenares de Gbit/s, las conversiones optoelectricas y de tránsito en los nodos intermedios obliga a aumentar de forma innecesaria el tamaño, consumo y número de los *routers*, así como la complejidad (y coste) de sus sistemas de gestión. Para corregir este problema, las otras dos evoluciones incluyen una capa de transmisión óptica pura, en la que el direccionamiento *grueso* se realiza a nivel óptico, que es muy simple y eficiente, y el *fino* a nivel eléctrico.

La frontera entre *fino* y *grueso* la constituye la granularidad de la capa óptica: la portadora. En estos momentos el tráfico mínimo por portadora es 2,5 Gbit/s, correspondiente a una trama STM-16, y se contempla bajar en algunos casos excepcionales a 1 Gbit/s, para asignar una trama Gigabit Ethernet a una portadora individual. También se contempla la posibilidad de actualizar las rutas de mayor tráfico a 10 Gbit/s por portadora, aunque en algunas plantas son muchas las fibras que no admiten esta velocidad de modulación por problemas de dispersión de polarización.

4.2. La opción de Red GMPLS

GMPLS, acrónimo del término MPLS generalizado, es una propuesta de extensión del estándar MPLS.

Los fabricantes de *routers* la han presentado en el *Internet Engineering Task Force* (IETF), con la intención de comenzar sus tareas de normalización a lo largo del año 2001 (obviamente, no existe fecha definida para su finalización). El MPLS, a su vez, es un conjunto de mecanismos y tecnologías que permiten realizar ingeniería de tráfico de altas prestaciones en IP.

El objetivo que se persigue con el GMPLS es integrar en un mismo plano de control la red IP y los conmutadores ópticos, de forma que el operador vea el reencaminamiento óptico como una funcionalidad más de los *router* IP. En la Figura 16. se representa un esquema de este tipo de red.

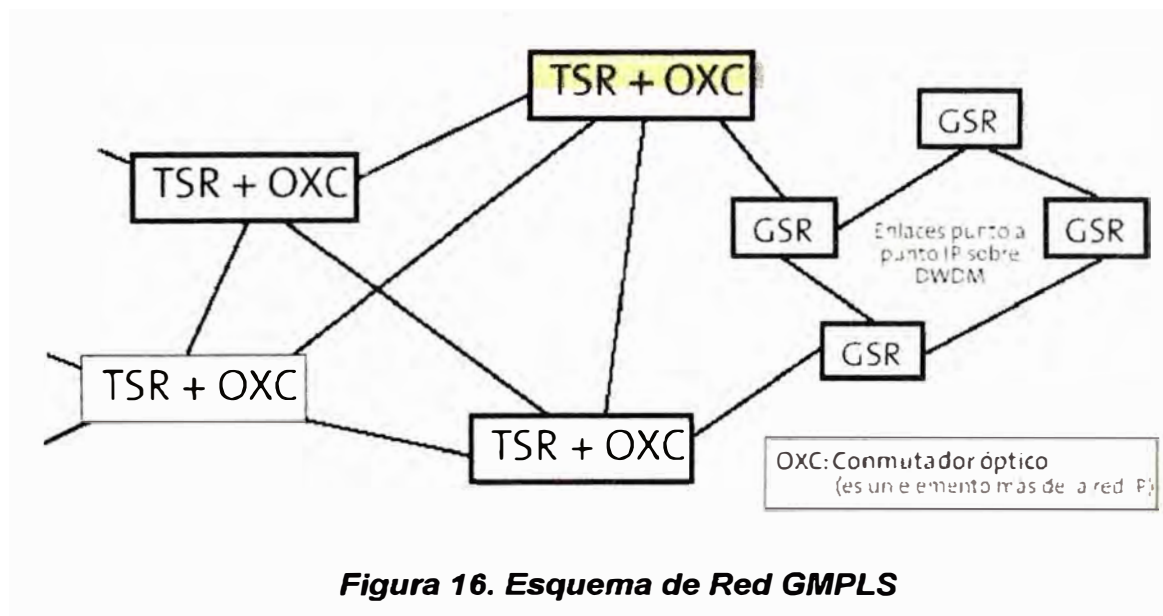


Figura 16. Esquema de Red GMPLS

En GMPLS se contempla la existencia de matrices de conmutación óptica, OXC (*Optical Cross-Connect*), que descargan a los *router* de gran parte del tráfico que no va destinado a ellos. Además, y aquí reside la

esencia del GMPLS, los OXC's se consideran como un apéndice o elemento integrado de los *routers*, de forma que el conjunto de *router* más OXC se considera a nivel lógico como un único elemento de red, y la agregación de tráfico en portadoras y su direccionamiento se realiza desde una misma plataforma de control y gestión.

Además de la ventaja que representa utilizar conmutadores ópticos, GMPLS ofrece las ventajas propias de las estrategias de integración, las cuales se pueden resumir de la forma siguiente:

- Al realizar bajo un mismo proceso la agregación eléctrica con la multiplexación óptica se optimiza el uso del ancho de banda.
- La monitorización y protección se realiza a nivel eléctrico, eliminando la necesidad de introducir para ello mecanismos adicionales a nivel óptico.
- Como generalización del punto anterior, no existe sistema de gestión de la capa óptica.

Frente a estas ventajas, GMPLS presenta también dos graves inconvenientes, uno de gestión, o de estrategia de operación, y otro de naturaleza física. El inconveniente de la estrategia de operación se puede describir de la siguiente manera: aunque en GMPLS las capas ópticas y eléctricas son vistas por el operador como una única entidad, en realidad existen como entidades físicas distintas. Por tanto, no es evidente que vaya en beneficio del operador integrar las dos capas, porque eso le obliga a

comprar la planta de conmutación y transmisión a los mismos suministradores. Por otra parte, en GMPLS se propone que, para poder implementar la función de reencaminamiento de tráfico, todos los conmutadores y *routers* dispongan de un mapa detallado de toda la planta.

Con este condicionante, la diversificación de suministradores sólo es posible si todos los estándares GMPLS están completamente cerrados y las interfaces de control no admiten ambigüedad. Aún así, dado que GMPLS es básicamente software, la interconexión entre subredes de distintos fabricantes exigiría un nivel de estabilidad de los estándares similar al que existe ahora en la planta de conmutación de circuitos; teniendo en cuenta que la definición del GMPLS está arrancando en estos momentos, puede que pasen varios años hasta que se alcance ese nivel.

Para intentar paliar este inconveniente, los fabricantes de *routers*, conscientes de la importancia que los operadores atribuyen a la posibilidad de gestionar de forma independiente las diferentes capas de la red, han propuesto en el IETF una variante del GMPLS, conocida como *overlay option GMPLS* (GMPLS superpuesta). En esta variante, la plataforma de control de la red sigue siendo única, pero el operador puede separar a nivel administrativo la gestión de los conmutadores ópticos de la gestión de los *routers*. Frente a ella, la propuesta original de control integrado de toda la red recibe el nombre de *peer option GMPLS* (GMPLS entre iguales). Queda por ver qué grado de independencia de gestión permitirá el IETF a los OXC.

El segundo inconveniente es más crítico y, sorprendentemente, no se menciona en las publicaciones relativas al GMPLS, ni en los artículos de los fabricantes. Se refiere al hecho de que una red óptica incluye, o deberá incluir, no solamente conmutadores ópticos, sino otros elementos de red, como filtros sintonizables de extracción e inserción, ecualizadores de intensidad o elementos de compensación de dispersión cromática, y que una capa óptica requiere un mínimo de supervisión, mediante análisis espectral independiente, de las capas de multiplexación eléctrica.

Para evitar estos problemas, se propone la tercera opción de evolución: la de red completamente óptica independiente.

4.3. La opción de Red Completamente Óptica Independiente

En este escenario, representado en la Figura 17, se distinguen diferentes elementos de red óptica (como conmutadores, filtros sintonizables, ecualizadores, etc.) y elementos terminales de red de transporte (como *routers*, *crossconnects* o ADM SDH y conmutadores ATM). La red de transmisión proporciona conectividad con reencaminamiento a nivel óptico y granularidad de portadora a las diferentes redes de transporte, y es independiente de todas ellas.

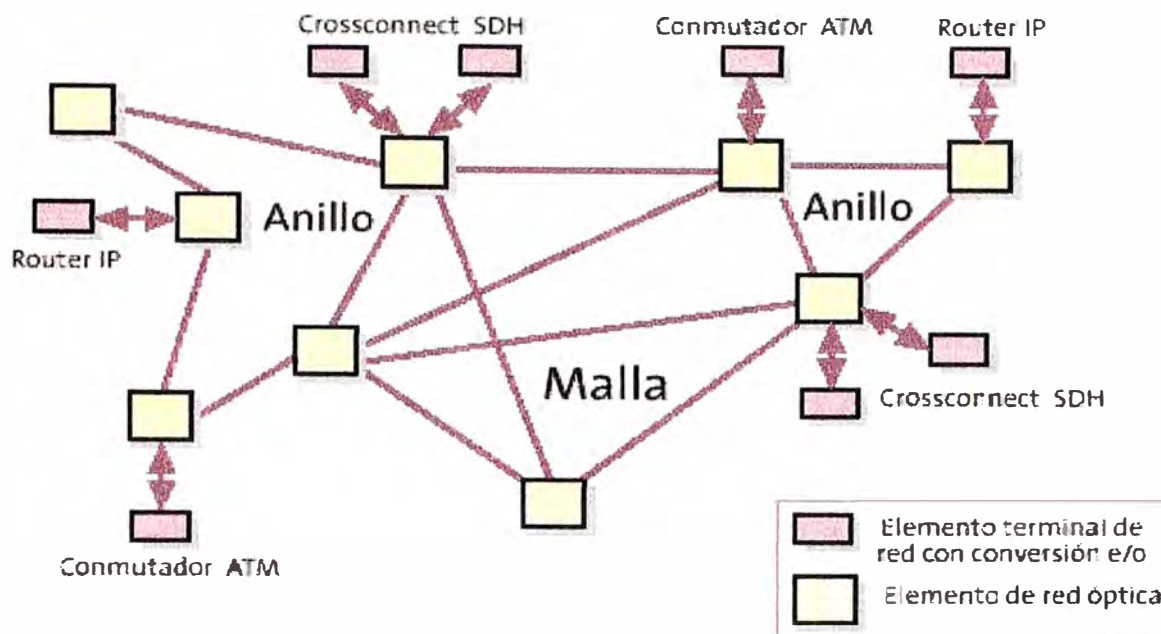


Figura 17. Esquema de Red Completamente Óptica Independiente

Además de contemplar cualquier tipo de elemento óptico, la principal característica que diferencia a esta opción de las anteriores es la independencia con respecto a las redes de transporte.

Abarca tres aspectos:

4.3.1. Independencia de formatos de modulación

La transmisión óptica es independiente del sistema de multiplexación eléctrico, incluso en las capas más bajas (la 1 y 2). La adaptación entre el entorno eléctrico y óptico se realiza en los transpondedores.

4.3.2. Independencia de sistemas de gestión

La independencia de los sistemas de gestión persigue dos objetivos:

- a) Permitir al operador, si así lo desea, adquirir los sistemas de gestión de suministradores diferentes.
- b) Dado que la funcionalidad de la capa óptica es mucho más simple que la de los estándares de multiplexación, el coste de su gestión deberá ser también muy inferior. El operador puede actualizar la gestión de su planta óptica sin verse forzado a adquirir una nueva versión del sistema de gestión de red de transporte, que potencialmente es más cara.

La simplicidad de la gestión de la capa óptica merece una aclaración. El operador puede manipular muy poco a una portadora; únicamente puede variar su intensidad, reencaminarla o filtrarla. Por contra, los elementos de las jerarquías de multiplexación eléctricas acceden al contenido digital de la señal, y sobre él pueden realizar una gran variedad de actuaciones, como modificar canales de servicio, medir tasas de error, actualizar mecanismos de corrección de errores, y un largo etc.

A nivel de gestión, la integración de la transmisión con el transporte se realiza de forma similar a como se integran en la actualidad sistemas y redes diferentes para ofrecer un único servicio: mediante un sistema de gestión de

orden superior, tal como se ilustra en la Figura 18. Este sistema lo suele desarrollar el propio operador a su medida.

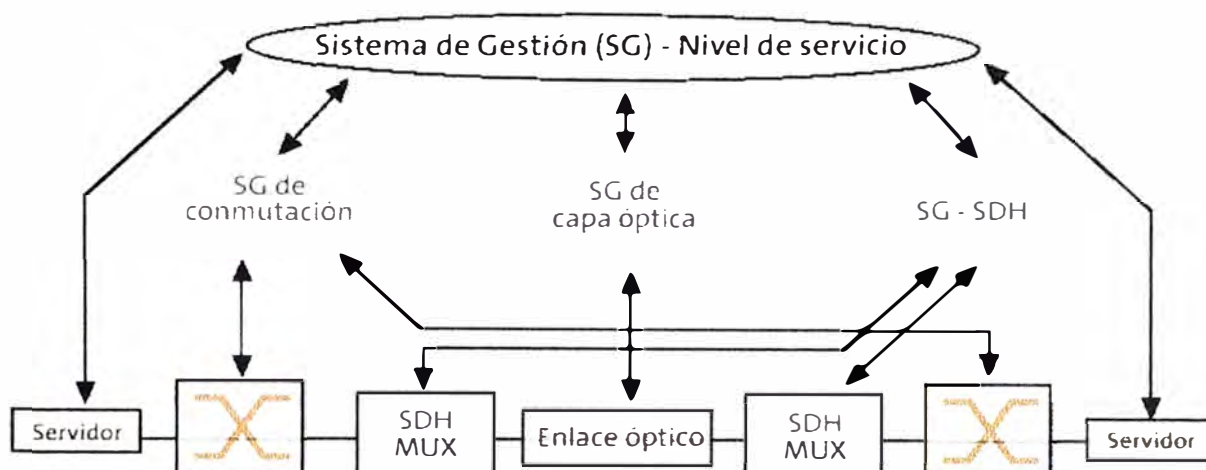


Figura 18. Interconexión de los sistemas de gestión

4.3.3. Independencia de los sistemas de protección

La independencia de los sistemas de protección es una consecuencia directa de la independencia de la transmisión óptica frente a los formatos de modulación. Si los enlaces soportan cualquier tipo de jerarquía de multiplexación, los mecanismos de protección óptica deben ser válidos para todas ellas. Además, la interacción o dependencia de la protección óptica con algún tipo de sistema de multiplexación conllevaría un interfuncionamiento de sus sistemas de gestión, en contra de los intereses descritos en el punto anterior.

De todo lo expuesto hasta este punto, se concluye que la evolución gradual hacia una transmisión completamente óptica independiente del transporte constituye probablemente la opción que defiende mejor los intereses a largo plazo de un operador multisuministrador. Ello no excluye que, a efectos de evaluación y diversificación, sea recomendable explorar otras opciones, como las dos variantes de GMPLS u otras propuestas que puedan surgir de nuevos foros de normalización.

A continuación, y en lo que queda de la presente investigación, se abordan aspectos fundamentales de las redes ópticas independientes, como son:

- Los mecanismos de supervisión.
- Los mecanismos de protección automática.
- El procedimientos de creación de red.
- El reencaminamiento.

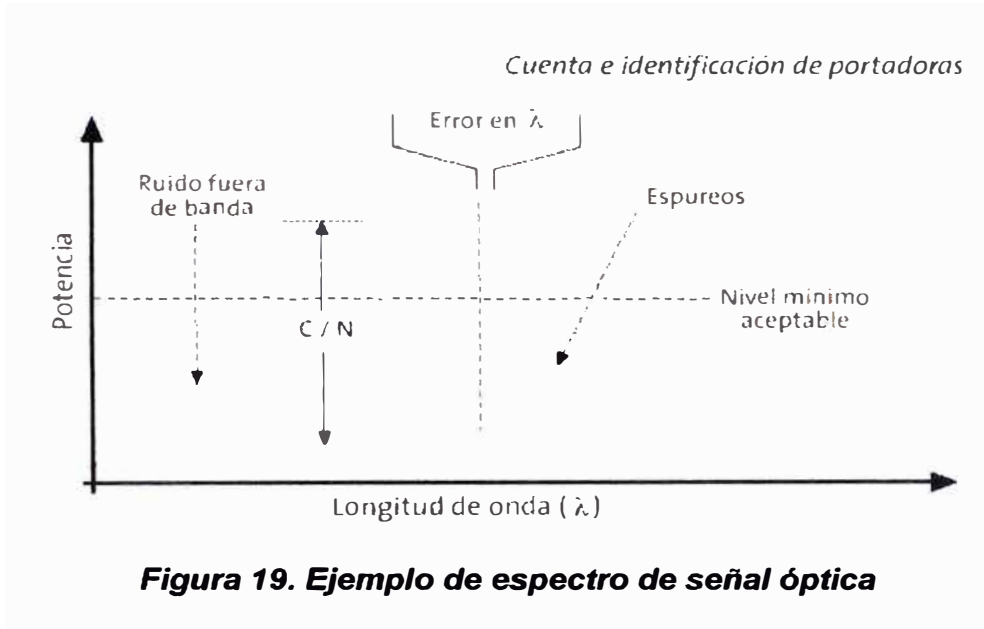
CAPÍTULO V

MECANISMOS DE SUPERVISIÓN DE REDES ÓPTICAS

Cada red de transporte dispone de sus propios mecanismos de medida de calidad. En general, todos ellos se basan en enviar unas tramas de referencia con contenido digital predeterminado y detectar en recepción los errores que se han generado en ellas. Una red óptica, en cambio, no accede al contenido digital, y la calidad se debe medir con parámetros independientes de las tramas. Esta medida es necesaria para identificar fallos o degradaciones en elementos de la red, así como para proporcionar información a efectos de restauración o reencaminamiento.

El mecanismo principal de medida de calidad, o supervisión, es el análisis espectral óptico (OSA). Consiste en extraer una muestra de la señal que se propaga por la fibra, introducirla en un analizador de espectros y comparar el resultado de la medida con una máscara predeterminada. En la Figura 19 se muestra un ejemplo de espectro óptico. Se puede apreciar un conjunto de portadoras sobre un fondo de ruido de emisión espontánea,

proveniente de amplificadores ópticos. Con la ayuda de marcadores se determina si las portadoras se encuentran en su posición espectral correcta, si el nivel de potencia es adecuado, si existen señales espúreas, etc.



En principio, los parámetros de calidad óptica son los siguientes:

5.1. Número de portadoras

Mediante el análisis del espectro el sistema de gestión puede determinar si en el punto de medida se encuentran las portadoras que deben estar, y que por lo tanto no ha habido corte en la planta entre el origen de la portadora y el punto de medida. Además, la resolución del análisis debe ser lo suficientemente fina como para determinar que en la ventana espectral asignada a una longitud de onda hay únicamente una portadora.

5.2. Potencia óptica y rizado

Un análisis espectral correcto proporciona la potencia óptica de cada portadora. El sistema de gestión debe comprobar si se encuentran dentro del margen permitido.

5.3. Relación portadora-ruido

Para una recepción correcta se requiere que la potencia de cada portadora sea superior a un umbral determinado, y también que sea superior a un umbral mínimo la relación portadora a ruido (C/N). Por ruido se entiende el de emisión espontánea de los amplificadores del enlace óptico, que en una traza de un analizador de espectros se manifiesta como un fondo de ruido variable lentamente con la longitud de onda.

5.4. Identificación de portadora

En las rutas que incluyen conmutadores, la señal presente en una longitud de onda puede proceder de un enlace entre varios posibles, y el operador debe poder identificar de cual de ellos procede. La identificación se lleva a cabo utilizando, como marcadores que diferencian unas portadoras de otras, parámetros tales como deriva en longitud de onda o desviación de la potencia con respecto a su valor nominal. En caso de ser necesario, el

operador puede marcar las portadoras, actuando sobre los elementos de red que sean necesarios. Por ejemplo, los puertos de entrada de las matrices de conmutación van precedidos de amplificadores ópticos y el operador puede variar levemente su ganancia para marcar las portadoras de ese puerto.

A estos parámetros de calidad se les puede denominar primarios; su cumplimiento es condición necesaria para un correcto funcionamiento de la red.

Existen otros, que se pueden considerar como secundarios; aportan información sobre el funcionamiento de la red, pero su incumplimiento se traduce de forma indirecta sobre los primarios, por lo que su medida podría en principio no ser estrictamente necesaria (aunque sí se recomienda). Son los siguientes:

5.5. Deriva en longitud de onda

Es la diferencia entre la longitud de onda central de una portadora y su valor nominal. Este parámetro se considera secundario, porque un valor de la deriva superior al ancho de banda de un canal se traduce en una atenuación de la portadora al pasar por un filtro óptico, o un multiplexor en longitud de onda.

5.6. Emisiones espúreas

Una emisión espúrea indica una degradación en el funcionamiento de un láser, que puede llegar a generar una alarma en su transpondedor asociado. En cualquier caso, dado que los transmisores van seguidos de un multiplexor, el espúreo queda muy atenuado antes de interferir sobre un canal adyacente.

5.7. Potencia óptica total

Por potencia óptica total se entiende la del conjunto de señales más la del ruido. En algunos casos esta medida puede ser conveniente, sobre todo si el nivel de ruido es significativo, y puede sacar de su zona de funcionamiento algún elemento de red, como un amplificador óptico.

A modo de ejemplo, en la Figura 20 se muestra el procedimiento de medida del espectro óptico sobre un elemento de red, una matriz de conmutación óptica.

Un analizador de espectro va accediendo uno a uno a todos los puertos de entrada y salida de la matriz, por medio de un selector óptico. La interfaz con el sistema de gestión se realiza a través de un módulo de control y comunicaciones.

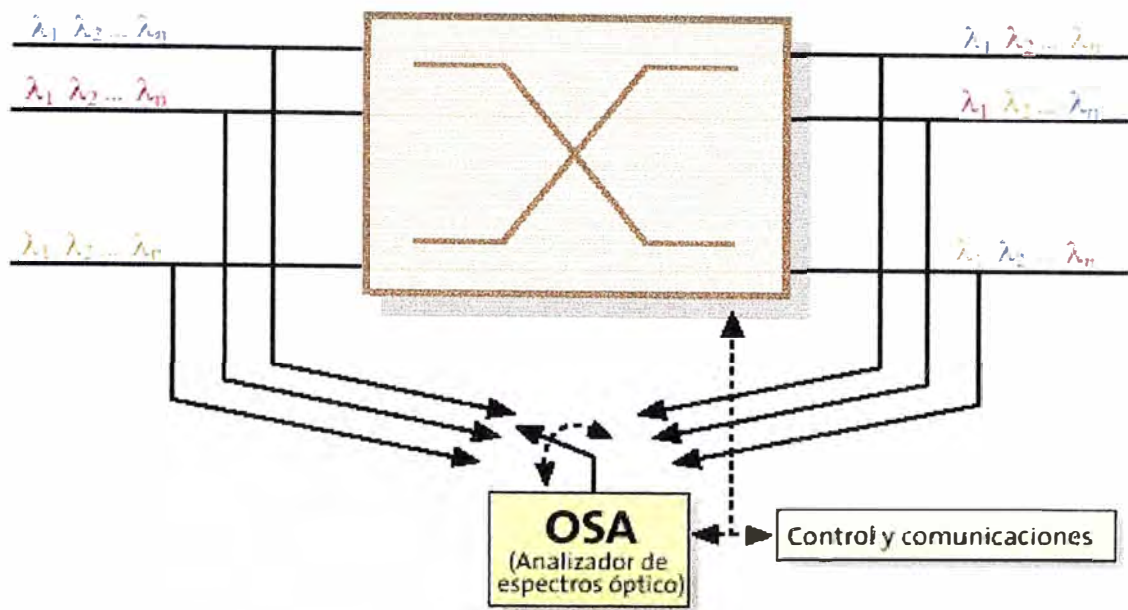


Figura 20. Supervisión mediante análisis espectral de una matriz de conmutación óptica

5.8. Limitaciones del Análisis Espectral

El análisis espectral mide amplitudes o intensidades. Sin embargo, una red óptica puede introducir degradaciones de fase que también degradan la calidad de la transmisión. Se han identificado dos:

1. Dispersión excesiva, cromática o de polarización.
2. Reflexiones elevadas en los conectores.

En general, estas degradaciones son estáticas, es decir, corresponden a imperfecciones de la planta, y por lo tanto se detectan, a

nivel de red de transporte, en el momento inicial de puesta en marcha y validación de los enlaces. Por otra parte, son difíciles de identificar; por ejemplo, para detectar si las reflexiones de un conector óptico son elevadas, porque está sucio o deteriorado, es necesario medir la fibra en la que está insertado con un equipo reflectométrico. Por tanto, la medida de la dispersión requiere equipos caros, que por el momento sólo se utilizan para la certificación manual de la planta óptica.

Pero aunque las degradaciones de fase son estáticas, no se puede descartar que también se vayan produciendo por algún fenómeno gradual de envejecimiento o deterioro de material. En consecuencia, es necesario incorporar en las redes ópticas algún mecanismo para su detección, que sea simple y susceptible de automatización. Este mecanismo existe, pero con limitaciones, y consiste en la medida de diagramas de ojo. La descripción del procedimiento de medida de diagramas de ojo se sale del ámbito de este trabajo. Simplemente se indica que, para cada una de las portadoras, se requiere:

- a) Fotodetectarla.
- b) Disponer de un reloj a la frecuencia de modulación.
- c) Muestrear la señal a una velocidad varias veces superior a su ancho de banda.
- d) Realizar un cierto procesado digital sobre los resultados del muestreo.

El procedimiento no es excesivamente complejo: el equipo que lo realiza es una combinación de analizador de espectros y osciloscopio digital. Pero el hecho de requerir información y circuitería específica de la velocidad de modulación, destruye la independencia del sistema de medida con respecto a la red óptica.

En conclusión, las hipotéticas degradaciones de la función de transferencia de fase de la planta óptica no se pueden detectar de manera práctica en el estado tecnológico actual, por lo que su eventual impacto sobre la calidad de las señales sólo se pueden medir a nivel eléctrico, mediante los mecanismos de supervisión de las redes de transporte. Esto a su vez implica que la supervisión de la red óptica con los mecanismos disponibles actualmente (análisis espectral) es un requisito necesario, pero no suficiente, para garantizar la calidad de la red de transmisión.

CAPÍTULO VI

MECANISMOS DE PROTECCIÓN AUTOMÁTICA

Uno de los aspectos que más impacto tiene en las redes de transmisión desde el punto de vista del cliente, con independencia de las características que le definan, es la garantía que debe ofrecer a las señales que transporta, a las cuales ofrece conectividad extremo a extremo. Los esquemas de protección que se han empleado hasta ahora en la construcción de las redes de transmisión (eléctricas) tienen su equivalente en las redes ópticas, con la salvedad de un factor diferenciador entre estos esquemas de funcionamiento. Mientras que en las redes eléctricas se debe conocer de antemano el formato de la señal para poder procesarla y posteriormente regenerarla, en las redes ópticas, gracias a la transparencia que tienen con respecto a las señales que transportan, no es necesario conocer el tipo de señal. Es más, debido a que están constituidas por componentes pasivos (la información se procesa analógicamente), éstos pueden procesar (proteger) simultáneamente más de una señal con independencia del tipo, formato y velocidad de éstas.

La misión de un sistema de protección es la de garantizar la entrega en el extremo destino de la señal que está siendo transportada, recuperándose ante fallos (simples) en cualquiera de los tramos de red por los que viaja la información, dentro de unas restricciones (límites máximos) temporales. Hoy en día, por ejemplo, en redes IP/SDH/WDM, se produce la situación en la que tres esquemas de protección distintos actúan sobre la información en el caso de que se produzca un fallo, estos esquemas son:

1. Enlace punto a punto WDM, **1+1**.
2. Capa SDH, típicamente con esquemas **1:1** o **m:n**.
3. Nivel IP, mediante reencaminamiento de los paquetes por otros puertos de salida del GSR.

La convivencia de múltiples mecanismos de protección no quiere decir, necesariamente, que la información tenga mayores garantías de alcanzar el destino en caso de fallos. Más aún, al no existir ninguna facilidad de coordinación entre capas puede llegar a ocurrir que se activen simultáneamente más de uno, haciendo que, finalmente, la señal se quede sin protección. Por tanto, parece razonable delegar en la capa de transmisión óptica la misión de proteger la/s señal/es, atendiendo tanto a la independencia que ofrece con respecto a las señales que transporta como a la elevada velocidad de restauración (tiempos de respuesta muy por debajo de los que actualmente se logran en las redes eléctricas). El esquema que se recomienda que se implemente en la capa óptica debe incluir, necesariamente la protección que se describe en los puntos siguientes.

6.1. Protección dedicada 1+1

La longitud de onda (color) se duplica en emisión, empleando para ello divisores ópticos. Cada uno de estos colores debe ir por caminos distintos (diversificación espacial); uno activo y otro de reserva. Por ejemplo, en un anillo la señal activa puede ir en dirección "ESTE" y la de reserva en dirección "OESTE".

Dado el gran volumen de datos que transporta cada una de las portadoras, es imprescindible que la información se duplique para que se pueda recuperar el fallo en el menor tiempo posible. Si la recuperación del fallo se efectúa, por ejemplo, en la parte emisora, implicaría que el receptor debe detectar el fallo, a continuación dicho receptor debe informar al origen y, por último, el emisor conmuta el envío de la información desde el canal de trabajo al canal de protección. Esta secuencia conlleva el intercambio de información de señalización, así como unos mayores tiempos de restablecimiento del servicio. Sin embargo, al efectuarse el proceso de recuperación en recepción, no se precisa el intercambio de información de señalización, se obtienen buenos tiempos de respuesta y se evita que otras capas de red detecten el fallo y activen sus mecanismos de protección.

6.2. Salida Doble

Cada subred que atraviese la información debe disponer de dos nodos de salida (en ubicaciones distintas) para garantizar la continuidad del camino óptico en caso de caída de alguno de ellos. En la Figura 21. se representa un esquema de conexión entre tres subredes con salida doble, conocida también como conexión *dual homing*.

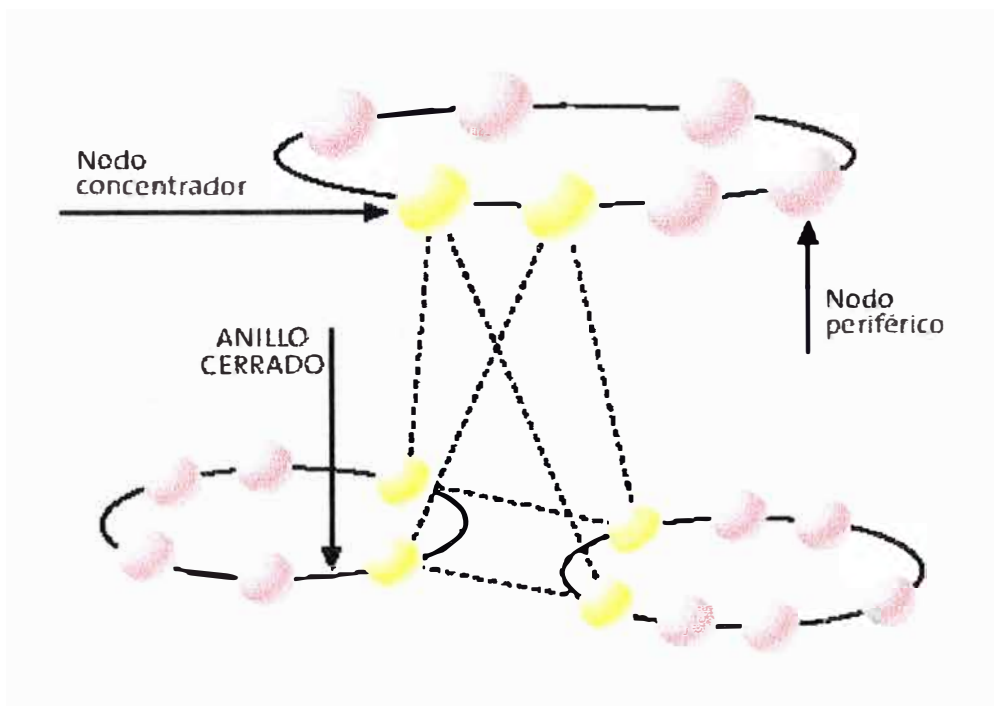


Figura 21. Esquema de conexión entre subredes con salida doble (dual homing)

6.3. Selección en recepción de la portadora adecuada

Al extremo receptor llegan las señales activa y de reserva, y es el propio receptor el que debe seleccionar la de más calidad. La selección se

realiza en un módulo específico de protección, que se representa de forma simplificada en la Figura 22.

En condiciones operativas normales el módulo está conectado a la ruta activa, pero conmuta a la de reserva cuando se produce en la activa un corte o degradación de señal inaceptable. En la Figura 22 se muestra la configuración más simple de un módulo de protección. De forma simultánea se mide la potencia de cada una de las portadoras en las dos rutas. Un circuito de control ordena la conmutación de la fibra activa a la de reserva cuando la potencia de un cierto número de portadoras, número definido por el operador a través del sistema de gestión, es inferior a un umbral predeterminado.

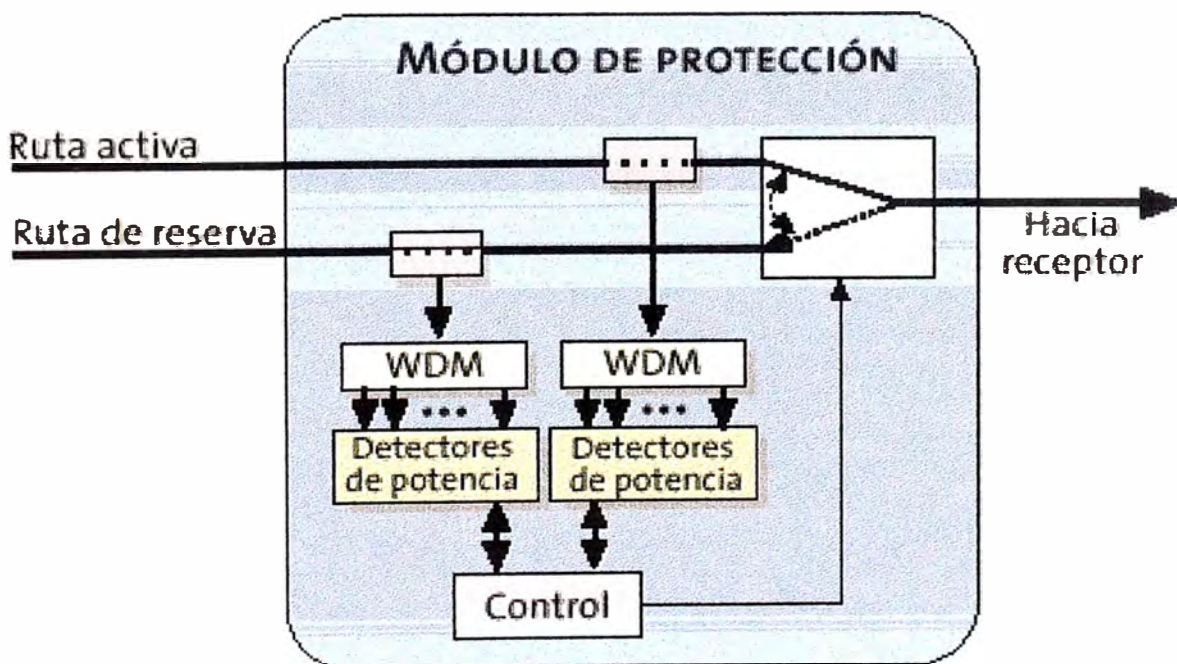


Figura 22. Esquema del módulo de protección

Un aspecto adicional que se debe considerar en el momento de establecer los caminos ópticos, con sus correspondientes rutas de protección, es evitar el establecimiento de bucles. Si en una red óptica se establece un bucle, se genera ruido de recirculación: si una señal se propaga por un enlace y eventualmente vuelve al punto de partida, deja de comportarse como señal útil y se manifiesta como interferencia. En el caso extremo de que la ganancia del bucle fuese superior a la unidad, la red entraría en oscilación. Para evitar este efecto se recomienda construir redes que trabajen con 4 fibras, un par dedicadas a trabajo (**Tx** y **Rx**) y otro par en reserva para protección, a la vez que siempre se encuentre algún tramo abierto en la red óptica. Esto es lo que se explica en el siguiente punto, con la conversión de topologías en anillo en topologías en *omega* (Ω), es decir, convertir el anillo en un bus mediante la apertura del mismo en uno de sus tramos.

CAPÍTULO VII

CREACIÓN DE RED ÓPTICA

La situación actual de las redes de transmisión óptica de la mayoría de operadores de telecomunicaciones es la de existencia de dos tipos de topologías de red óptica:

7.1. Enlaces WDM punto a punto

Con capacidades típicas de 16λ a 2,5 Gbit/s y protección 1+1, que permiten conectar nodos concentradores de localidades geográficamente separadas y con elevada demanda de tráfico.

7.2. Anillos metropolitanos

Con esquemas de protección propios de estas topologías (por ejemplo, los conocidos como *OMS-SP ring*, anillo con protección compartida en la sección de multiplexación óptica, o *OCh-DP ring*, anillo con protección dedicada por canal óptico) y encaminamiento a nivel óptico estático (configurado con antelación a la puesta en servicio).

Los enlaces punto a punto WDM, habitualmente, no están conectados entre sí, perdiéndose toda capacidad de encaminamiento a nivel óptico, cualidad que se conseguiría mediante la creación de una malla óptica. Por tanto, *es necesario definir los esquemas de conexión de estos enlaces punto a punto WDM*, de manera que se incluyan los mecanismos de protección comentados en el apartado anterior, a la vez que se doten de nuevas funcionalidades de encaminamiento.

En cuanto a los anillos metropolitanos, son una infraestructura ampliamente usada, pero que, debido a su filosofía de funcionamiento actual, deben evolucionar para permitir la creación de una red óptica transparente entre extremos. Uno de los primeros pasos que hay que efectuar con los anillos es su apertura, para convertirlos en topologías en *omega* (Ω). Una vez abiertos, los anillos se comportan en realidad como buses (similares a los enlaces punto a punto), sobre los que se definen unos nuevos nodos, concentrador y periférico, cuya funcionalidad se detalla más adelante. Esta situación se refleja en la Figura 23.

Una vez que los anillos están abiertos, cabe plantearse qué otros aspectos deben tenerse en cuenta con vistas a interconectarlos entre sí. Los principales son los siguientes:

- Los buses deben estar compuestos por *4 fibras* (ver la Figura 24), un par para trabajo y otro para protección. En cada par se empleará una fibra para la transmisión y otra para la recepción.

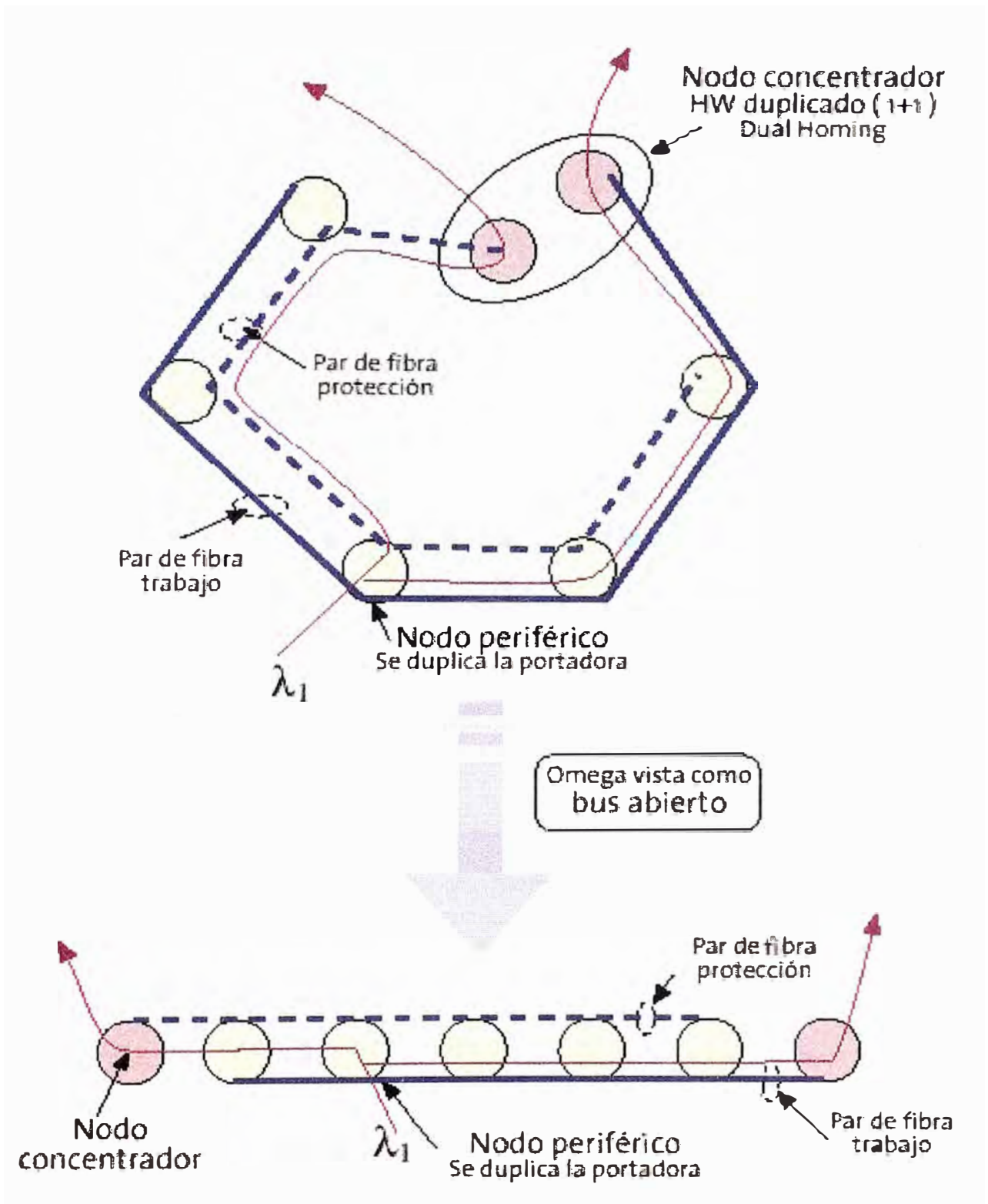


Figura 23. Paso de anillo a omega

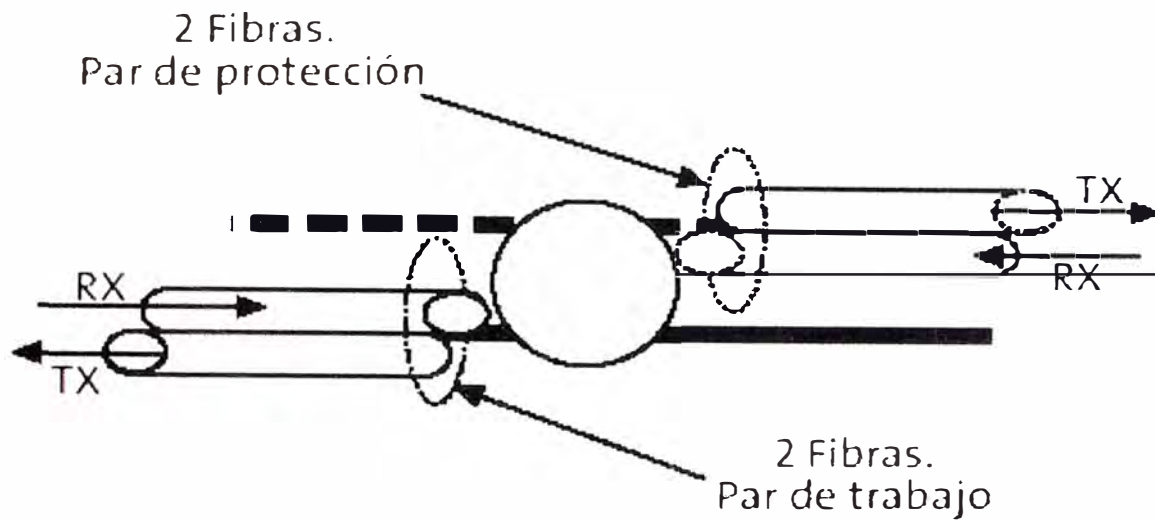


Figura 24. Esquema de 4 fibras (trabajo+protección)

- Dado que se debe disponer de salida *Dual Homing* en cada subred y, además, debe estar abierta (Ω), se recomienda que cada par de fibras (par de protección y par de trabajo) finalice en nodos concentradores distintos (ver la Figura 23).
- Si se quiere garantizar la protección, tanto dentro de la subred como fuera de ella, es necesario que los pares de fibra (trabajo y protección) estén instalados por caminos distintos (diversidad espacial).

Con estas consideraciones como punto de partida, los pasos recomendados a dar para crear una red óptica transparente a partir de enlaces punto a punto WDM y anillos ópticos son:

7.3. Apertura de anillos

En primer lugar, se deben *abrir los anillos*, convirtiéndolos en *omegas* (Ω , equivalentes a buses) para garantizar que no se producirán bucles. No hay que olvidar que se consideran siempre dos trayectos: el de trabajo y el de protección, cada uno de ellos con dos fibras ópticas, una para cada sentido de la transmisión (recepción y transmisión). Se tiene por tanto una topología de red que empleará cuatro fibras.

7.4. Definición de los nodos concentrador y periférico

A efectos de interconexión de subredes, los nodos de una subred se clasifican en dos tipos:

- Nodos Concentradores
- Nodos Periféricos

7.4.1. Nodos concentradores

Es en estos nodos donde se realiza la interconexión entre subredes propiamente dicha, extrayendo, insertando o redirigiendo portadoras a/de diferentes subredes.

En la Figura 25 se representa un ejemplo de implementación de nodo concentrador. Tiene como misión:

- a) *Garantizar la salida de las portadoras de la subred a la que pertenece, redirigiéndolas a otro nodo concentrador.*
- b) *Encaminar las provenientes de otros nodos dentro de la subred, ofreciendo siempre dos puntos de salida (Dual Homing) y manteniendo, en cualquier caso, la red abierta.*

El requerimiento de dos puntos de salida se traduce en que en una misma subred existan dos nodos concentradores, tal como se ilustra en la Figura 23. La complejidad de estos nodos es proporcional al número de nodos concentradores a los que se conecten, no existiendo, inicialmente, más restricciones que las relativas a la capacidad de los componentes que se empleen. Para paliar/restringir dicha complejidad se *recomienda conectar cada nodo concentrador con dos nodos concentradores más*, limitándose, de este modo, su dificultad de construcción, a la vez que se respetan los esquemas de encaminamiento y protección de longitudes de onda.

En la Figura 25 la configuración es la siguiente:

- El nodo concentrador interconecta al periférico C con los también concentradores A y B.

- La asignación de longitudes de onda es: λ_1 va del nodo C al B, λ_2 del A al C, λ_3 del B al A; y λ_4 va del nodo C al A.

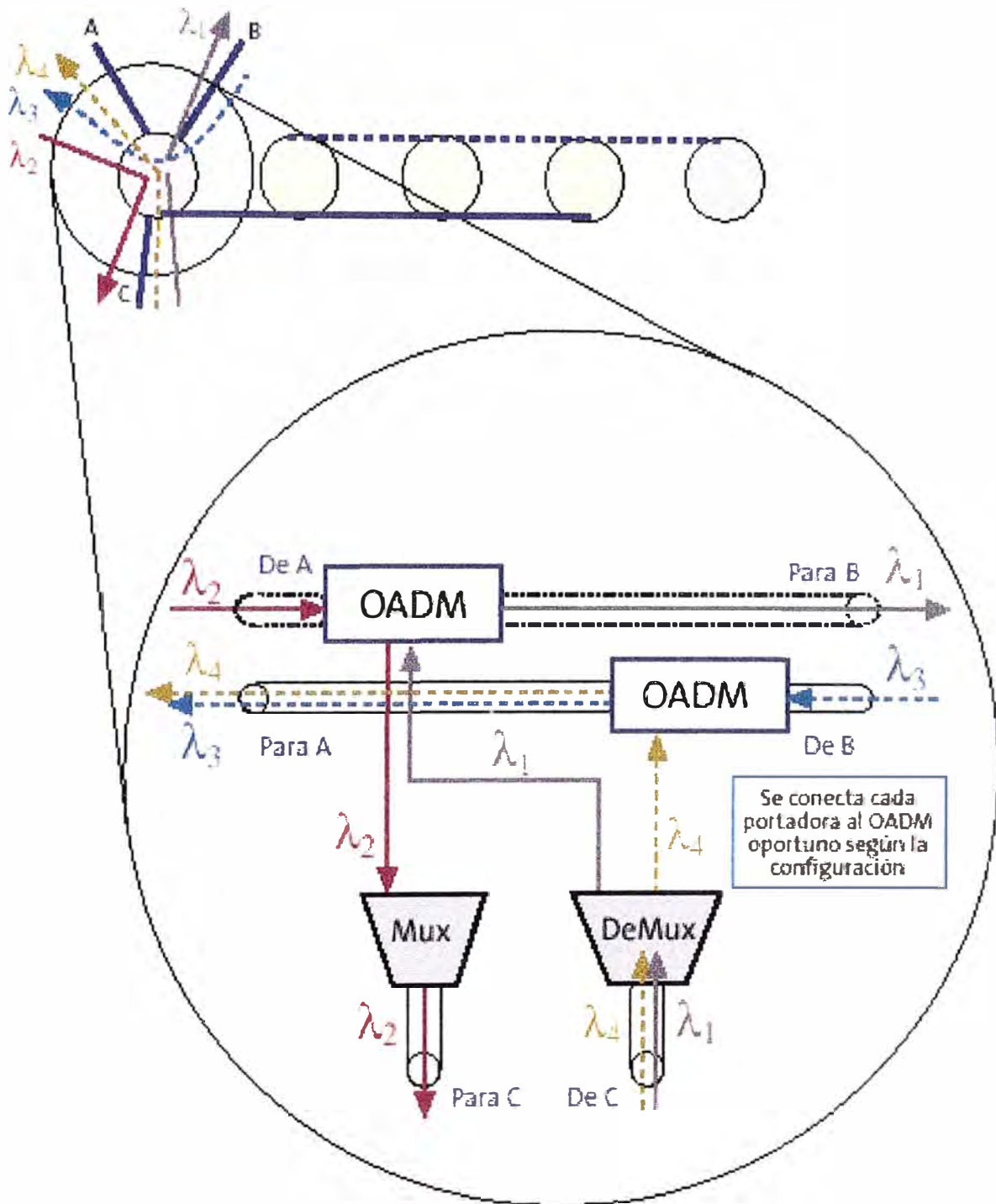


Figura 25. Esquema de nodo concentrador

7.4.2. Nodos periféricos

En los nodos periféricos se insertan y extraen las portadoras provenientes de elementos terminales de red de transporte y sus transpondedores asociados.

La Figura 26 representa un ejemplo de nodo periférico. Las portadoras que se insertan en el nodo se duplican mediante un divisor óptico, mientras que las que se extraen se procesan en un módulo de protección, que entrega al transpondedor de un elemento de red de transporte la portadora activa o de reserva, dependiendo de su calidad. En el ejemplo de la Figura 26, en el nodo periférico se inserta la longitud de onda λ_1 , y se extrae λ_2 .

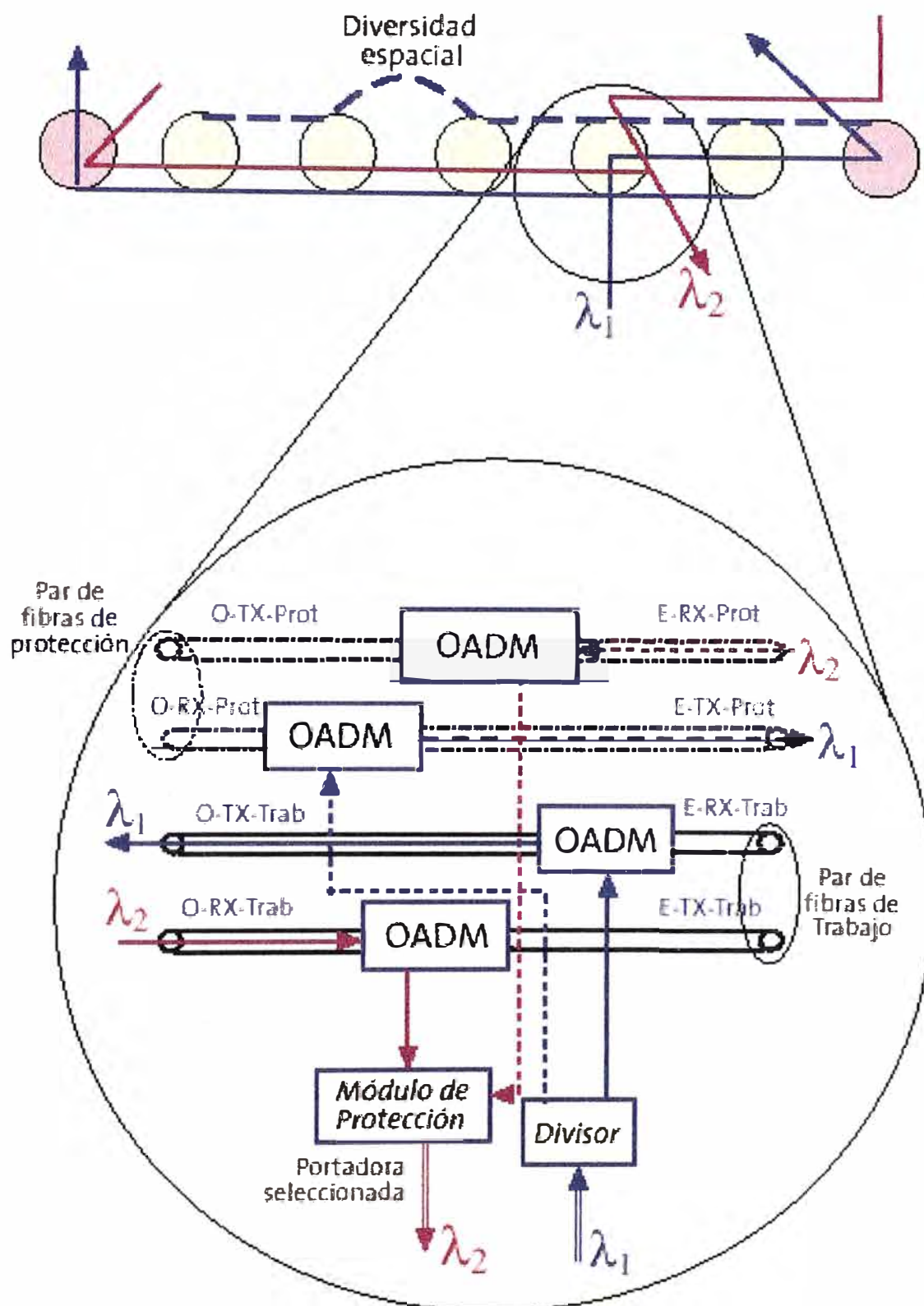


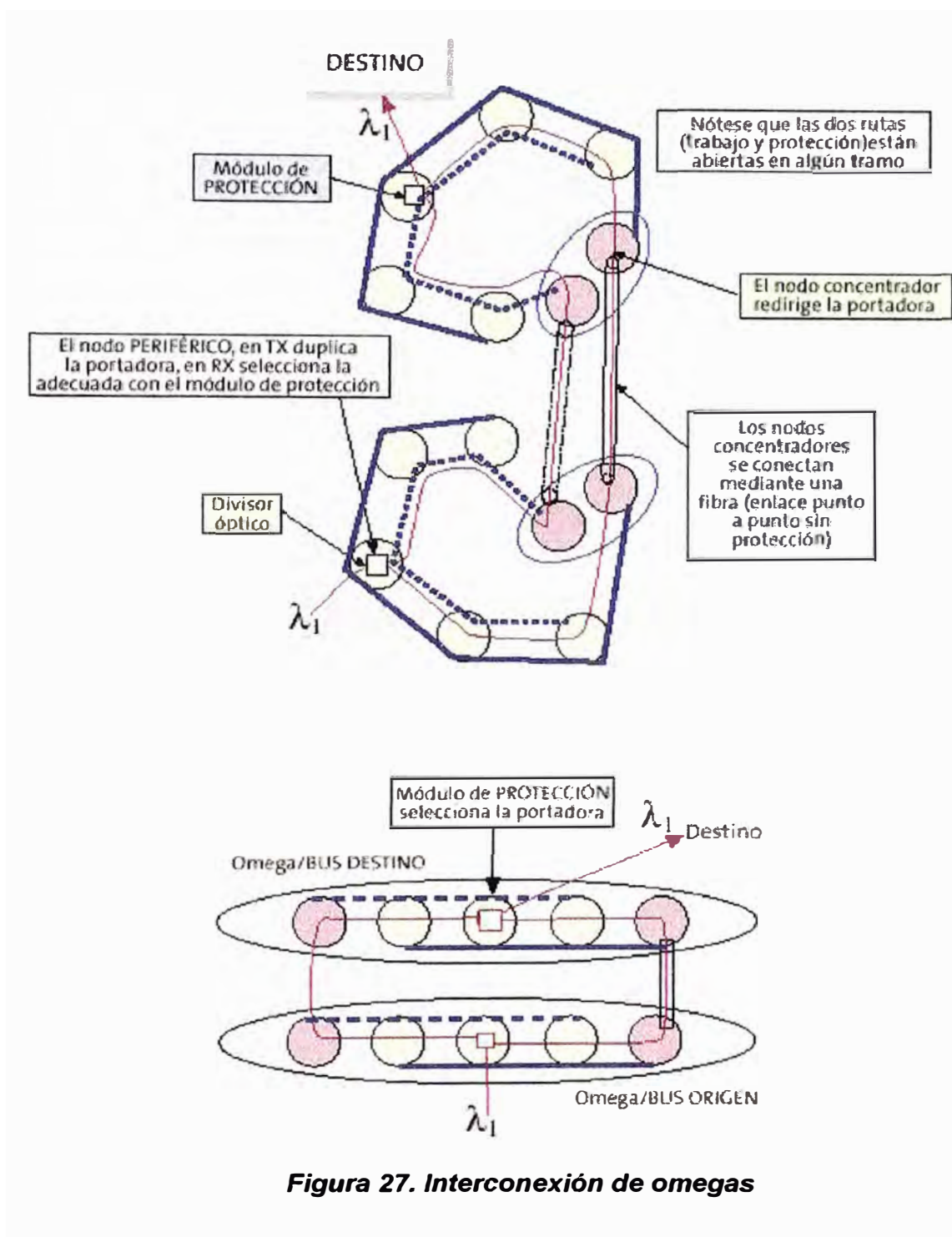
Figura 26. Esquema de nodo periférico

En la Figura 25 y la Figura 26 las funciones de extracción e inserción de portadoras se realizan con filtros OADM. Si la complejidad de la red así lo requiriese, los filtros se podrían sustituir por conmutadores ópticos, que ofrecen una mayor capacidad de reencaminamiento. Tanto los filtros OADM como los conmutadores se describen en un apartado posterior.

7.5. Interconexión de subredes

Los distintos segmentos se interconectan entre iguales, es decir, las portadoras que se transportan por los pares de fibra de trabajo en la red origen siguen por las fibras de trabajo en la red destino (lo mismo sucede con el par de fibra de protección, ver la Figura 27). Hay que destacar que todos los tramos por los que va pasando la información no precisan de mecanismos de protección adicionales, ya que ésta se duplica en origen (**1+1**) y se recupera en destino.

La interconexión de los diferentes segmentos de red (subredes ópticas) debe realizarse de manera ordenada, para evitar que la simplicidad que se busca con la capa óptica se torne en complejidad en la planta de fibra cuando se realizan las labores de interconexión. En la Figura 28 se representa la interconexión de 3 *omegas*, mostrándose únicamente la fibra



de transmisión (se necesita otro número igual de fibras para la recepción). Es una interconexión que comienza a ser compleja: a medida que aumenta el número de subredes que se conectan entre sí aumentan también los pares de fibras que se necesitan para la interconexión.

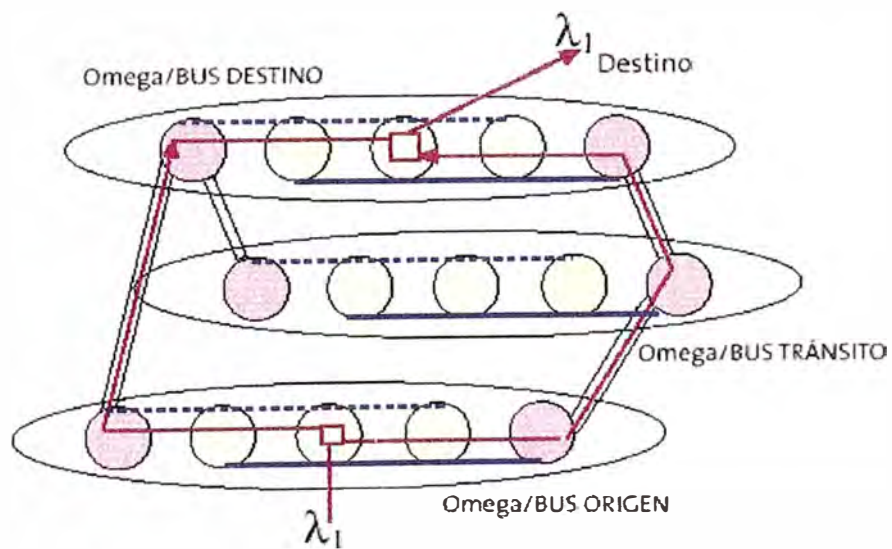
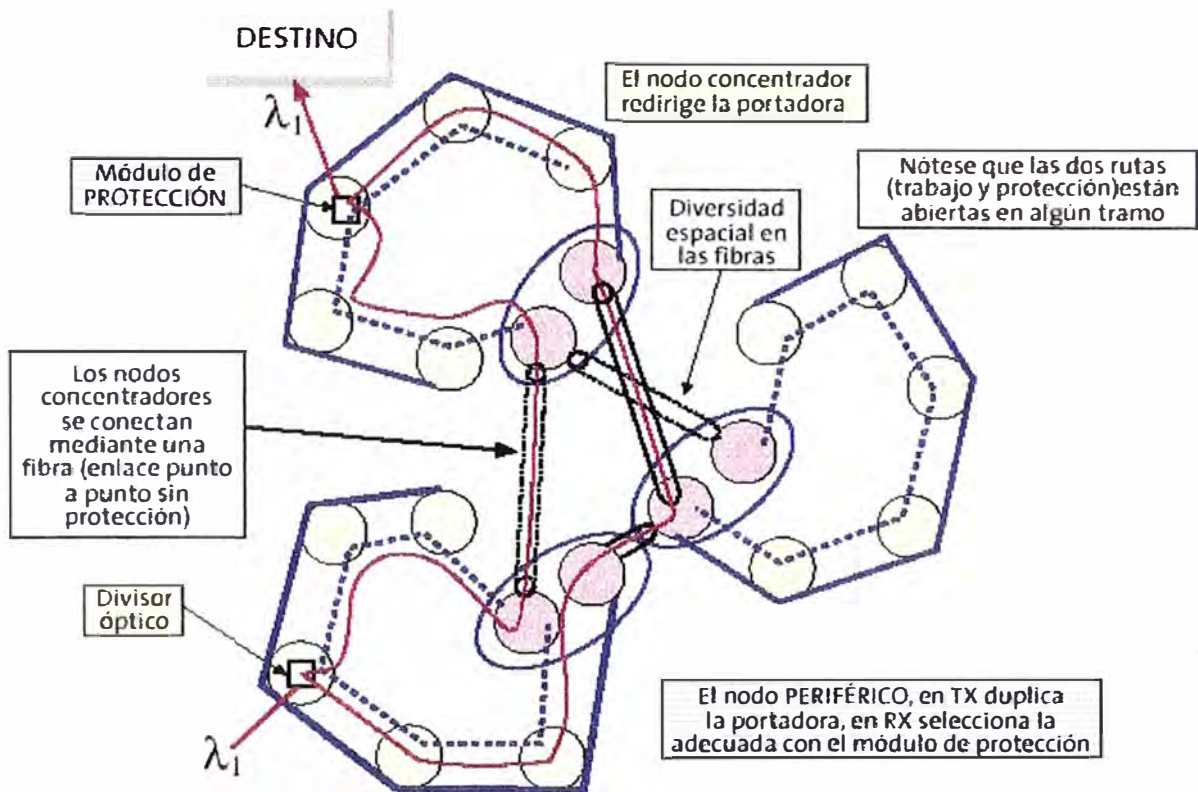


Figura 28. Interconexión de 3 omegas (esquema no recomendado)

Para mantener este número de pares al mínimo, se recomienda reemplazar el esquema de la Figura 28 por el más sencillo de la Figura 29, en el que la interconexión se realiza mediante conmutadores ópticos OXCs. Para garantizar que las subredes interconectadas continúen abiertas se recomienda que cada OXC procese un tipo de tráfico (el de trabajo y el de protección).

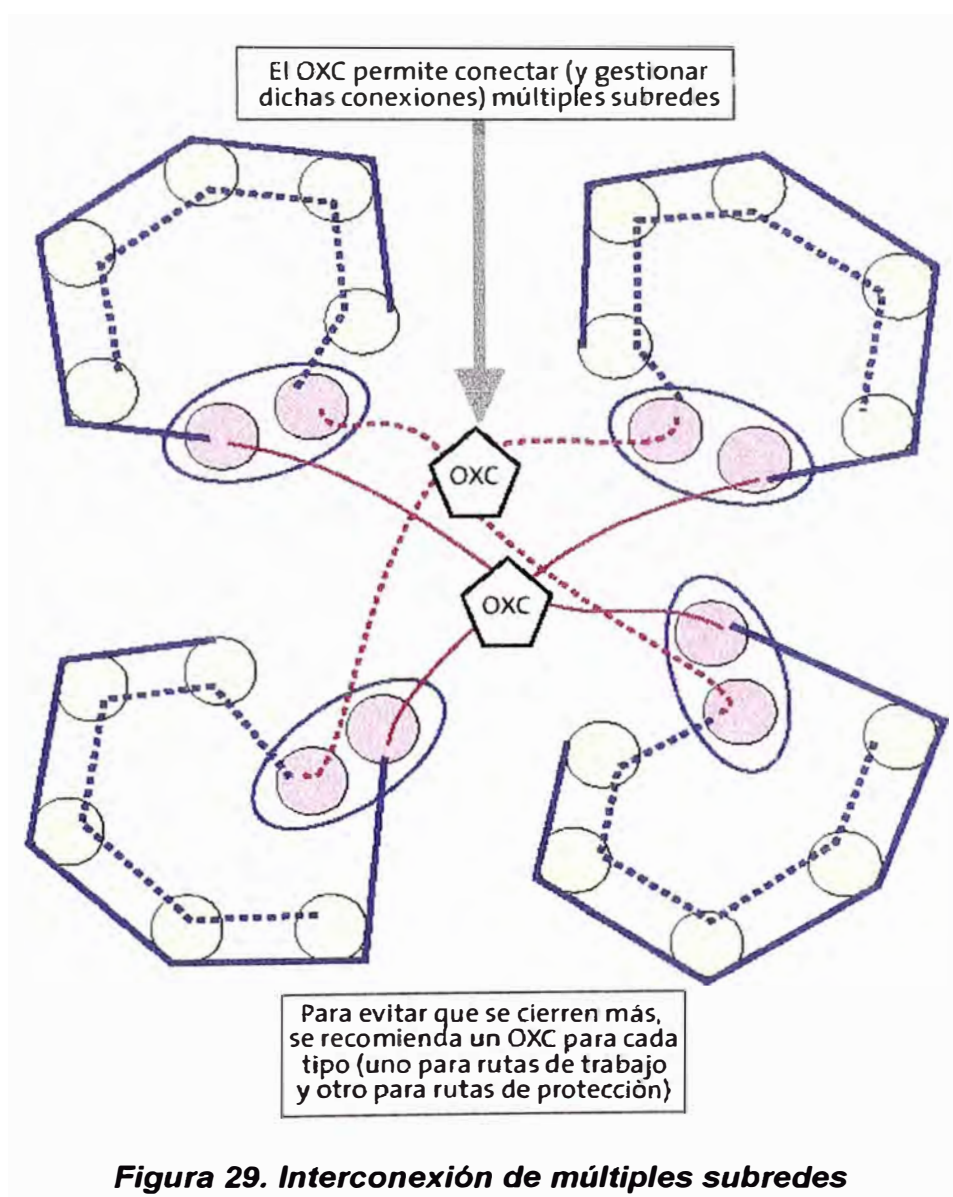


Figura 29. Interconexión de múltiples subredes con OXCs (recomendado)

El uso de los OXCs no está restringido a la interconexión de subredes, sino que también se pueden considerar para simplificar la realización de los nodos concentradores y periféricos, a la vez que se les dotaría de mayores funcionalidades.

Otro aspecto a considerar en la creación de una red óptica es el impacto que ocasionaría sobre una red, ya establecida, la inclusión de nuevos elementos que aportasen nuevas funcionalidades y flexibilidad, como, por ejemplo, OADMs sintonizables. La inclusión de estos nuevos elementos supondría un rediseño de la red, que, por su complejidad, requiere un estudio más detallado que esta fuera de los objetivos de este trabajo.

CAPÍTULO VIII

IMPACTO DEL REENCAMINAMIENTO A NIVEL ÓPTICO

El reencaminamiento de los caminos ópticos puede ser iniciado por el operador, cuando se desea introducir cambios en la configuración de red, o bien de forma automática por algún sistema de gestión, como consecuencia de fallos en la planta.

Con respecto a esta segunda posibilidad, el hecho de que los sistemas automáticos de protección garanticen la integridad de la señal frente a averías en la red se traduce en que no existe, por el momento, ningún requisito estricto de velocidad de reencaminamiento. Independientemente de su origen, la implementación del reencaminamiento involucra, entre otros, al sistema de gestión de la capa óptica, que debe ser capaz de encontrar rutas posibles y analizar su viabilidad.

En concreto, el procedimiento de reencaminamiento comprende los pasos siguientes:

- Encontrar el camino más corto entre dos nodos
- Analizar la viabilidad de la ruta para cada una de las portadoras
- Activar la ruta en régimen de pruebas y medir la calidad de señal extremo a extremo
- Puesta en servicio

8.1. Encontrar el camino más corto entre dos nodos

Este es un problema topológico clásico. Dados dos nodos de red y un mapa de capacidad óptica disponible, el sistema de gestión de la red óptica ha de encontrar la ruta más corta entre ellos. En el caso de que los nodos sean los puertos de acceso a los elementos terminales de red origen y destino de la ruta óptica, se deberán encontrar al menos dos rutas disjuntas, una activa y otra de reserva.

8.2. Analizar la viabilidad de la ruta para cada una de las portadoras

Este paso consiste en analizar y comprobar que el ruido acumulado a lo largo de la ruta, la dispersión, la relación C/N final, la carga de los amplificadores ópticos, etc., se encuentra dentro de los márgenes de calidad exigidos.

8.3. Activar la ruta en régimen de pruebas y medir la calidad de señal extremo a extremo

La ruta se activa inicialmente con tráfico simulado. La calidad se mide tanto a nivel de capa óptica, mediante análisis espectral y comprobando que no se ha generado ninguna alarma, como a nivel de redes de transporte, para asegurar la calidad de servicio completo extremo a extremo.

8.4. Puesta en servicio

Una vez comprobada la calidad de la ruta o rutas, pueden ser puestas en servicio con tráfico real. El reencaminamiento es un procedimiento que se debe llevar a cabo para todas las portadoras. Puede que diferentes grupos de portadoras se encaminen por rutas diferentes cuando no sea posible agruparlas todas sobre el mismo camino óptico.

CONCLUSIONES

1. En este trabajo se aborda la evolución de las redes de transmisión actuales, que están compuestas por enlaces DWDM independientes, hacia una red de transmisión completamente óptica. Esta red de transmisión proporciona conectividad transparente a las diferentes redes de transporte de orden superior, sin conversiones electroópticas intermedias y con granularidad de portadora óptica.
2. De entre las diferentes opciones que se plantean a la hora de configurar la red óptica de transmisión, se ha elegido la que proporciona mayor independencia al operador. Esta opción no está en línea con la propuesta conocida como GMPLS, que trata a la red óptica como un elemento IP más, y que está siendo defendida por los fabricantes de grandes *routers*. A su vez, se aconseja dotar a la red de un mecanismo de supervisión propio, basado en análisis espectral, que permite identificar fallos y degradaciones en los elementos de red óptica, con excepción de los que afectan únicamente a la función de transferencia de fase.

3. En el trabajo se presta atención especial a la tarea de creación de red, o conjunto de reglas que permiten transformar un conjunto de enlaces y anillos independientes en una red con conectividad transparente entre elementos extremos. Se pueden resumir en la necesidad de mantener protección automática 1+1 con fibras de trabajo y protección separadas, evitar bucles, definir dos tipos de nodos, periféricos y concentradores, y, finalmente, emplear conmutadores ópticos para la interconexión de subredes.

4. El conmutador óptico (OXC), es el elemento más característico de una red óptica, que la dota de capacidad de reencaminamiento a nivel de portadora. En el OXC se destaca el hecho de que no se necesitan matrices de conmutadores espaciales con un gran número de puertos, sino conjuntos de conmutadores de pocos puertos, conectados a las entradas y salidas mediante multiplexores y demultiplexores en longitud de onda.

5. En resumen, el despliegue de una red completamente óptica permite al operador disponer de una capa de transmisión de gran capacidad con una gestión muy simple. Será la base sobre la que se puedan construir diferentes redes de transporte IP, o cualquier otro tipo de red que en su momento se necesite.

ANEXO I

CONSIDERACIONES DE LOS ELEMENTOS DE RED

- **Matrices de Conmutación Óptica**

Por matriz de conmutación óptica (OXC), se suelen entender dos elementos diferentes: el conmutador espacial de fibra y el reencaminador en longitud de onda. En ambos, un conjunto de fibras ópticas de entrada se conecta con otro de igual número de fibras de salida. En el primer caso todas las señales ópticas de una fibra de entrada se encaminan hacia otra de salida, mientras que en el segundo las portadoras ópticas de las fibras de entrada se reencaminan hacia las de salida de forma individual. Esta segunda acepción es la que se adopta en este trabajo y se representa en el diagrama de la Figura 30.

El OXC es el elemento que más flexibilidad dota a una red óptica. A nivel de ejemplo, en el esquema de interconexión de subredes de la Figura 29, los OXCs permiten el establecimiento de enlaces ópticos en longitudes de onda individuales entre elementos de diferentes subredes. Generalizando

el ejemplo, los OXC's posibilitan el reencamamiento óptico extremo a extremo con granularidad de portadora.

Con el fin de ilustrar sus capacidades y requisitos, en la Figura 30 se muestra el esquema de un conmutador de dos fibras de entrada y dos de salida, y cuatro longitudes de onda diferentes (por simplicidad, se ha omitido la parte de comunicación y control). A las longitudes de onda se las representa como λ o λ^* , dependiendo de si entran en el conmutador por una u otra fibra.

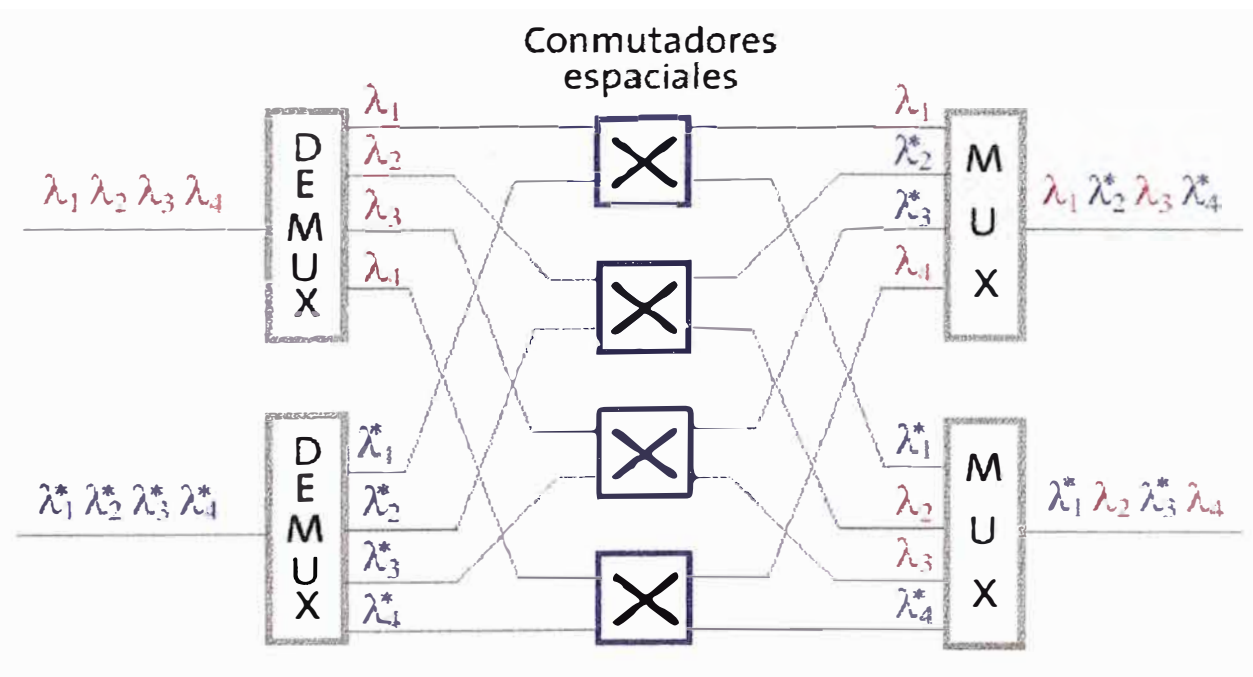


Figura 30. Diagrama de bloques de un conmutador óptico

En la Figura 30 se resalta el hecho de que un conmutador óptico consta de tres etapas: una primera en que las portadoras de entrada se separan espacialmente, una segunda de conmutación espacial y una final de

concentración. Se puede observar, además, que el tamaño de los conmutadores espaciales lo determina el número de fibras, no el de longitudes de onda: en un conmutador óptico son necesarios tantos conmutadores espaciales individuales como longitudes de onda y el número de puertos de cada conmutador espacial es igual al de fibras de entrada (igual al de salida).

Por último, cabe mencionar los requisitos mínimos de calidad de transmisión que deben cumplir los conmutadores, y que son los relativos a pérdidas de inserción y diafonía. Las pérdidas de inserción deben ser inferiores a las que puede compensar un amplificador óptico sin introducir un ruido excesivo de emisión espontánea, y se estiman en 15 dB. La diafonía debe ser lo suficientemente baja como para no degradar enlaces por el mecanismo de interferencia homodina, y se fija en -45 dB. Se puede demostrar que esta especificación se traduce en requisitos aproximados de diafonía de los conmutadores espaciales de -45 dB y -25 dB, aproximadamente, en los multiplexores y demultiplexores.

- **Amplificadores ópticos**

El reencaminamiento a nivel óptico se traduce sobre los amplificadores en una variación del número de portadoras que deben amplificar. Esta variación impone dos requisitos:

1. El transitorio que sufre el amplificador cuando a su entrada se añade o retira un conjunto de portadoras no debe degradar la calidad del resto de portadoras en tránsito.

2. Los amplificadores deben trabajar en régimen de ganancia constante, independiente del nivel de potencia a su entrada. El nivel de ganancia debe, además, ser ajustable desde el sistema de gestión, dentro de unos márgenes de ingeniería de operación.

- **Filtros de extracción e inserción**

Los filtros, también llamados multiplexores, de extracción e inserción óptica (OADM) están representados en el diagrama de enlace óptico de la Figura 14. Son elementos que extraen de una fibra una portadora óptica e insertan otra. En unos filtros la longitud de onda que se inserta es nominalmente igual a la que se extrae; en otros es diferente. La extracción e inserción de una portadora se puede generalizar a una banda óptica, en la que caben varias portadoras contiguas.

En la actualidad comienzan a utilizarse filtros de este tipo, pero en la mayoría sus longitudes de onda de operación son fijas. En algunos casos, y con toda seguridad en las redes ópticas transparentes del futuro, son o serán sintonizables, de forma que el operador pueda seleccionar la longitud, o longitudes, de onda que se extraen e insertan. Esta capacidad de sintonía

transforma al filtro fijo de elemento pasivo y coste bajo en elemento de red gestionable y precio elevado.

- **Ecualesadores**

Se puede demostrar que un sistema de transmisión multiportadora está optimizado en cuanto a calidad de señal cuando tanto la intensidad óptica como la relación C/N es igual en todas las portadoras. En redes reconfigurables puede ser difícil acercarse a estas dos condiciones simultáneamente, por lo que será necesario aproximarse a ellas mediante ecualizadores ópticos variables.

Con respecto al sistema de gestión, los ecualizadores variables imponen los condicionantes siguientes:

- La respuesta espectral del ecualizador debe poder ser ajustable desde el sistema de gestión.
- Para asegurar un funcionamiento correcto, se requiere supervisión mediante análisis espectral a la salida del ecualizador, de forma que el sistema de gestión pueda medir el rizado de intensidad óptica dentro de la banda de longitudes de onda de operación.

Si las redes ópticas son simples, como ocurrirá en las primeras fases de su evolución, los ecualizadores pueden sustituirse por atenuadores variables,

colocados en las entradas de los elementos donde se realiza la agregación de portadoras. Los atenuadores variables son elementos ya disponibles comercialmente, mientras que los ecualizadores se encuentran todavía en fase precomercial.

- **Canales de servicio**

Los amplificadores ópticos que se instalan en planta incorporan una interfaz de supervisión y control que se comunica con el exterior a través de un canal de servicio. El canal de servicio se transmite en una portadora óptica específica de supervisión, normalmente en la longitud de onda de 1510 nm, que va accediendo de forma secuencial a todos los amplificadores de un enlace, tal como se ilustra en la Figura 31.

El acceso a cada amplificador no es transparente: en cada amplificador se extrae de la fibra de señal la portadora de supervisión mediante un demultiplexor óptico, se fotodetecta y de la señal eléctrica resultante se extrae la información dirigida al amplificador.

A continuación se inserta en el canal la información generada por el amplificador y con la trama resultante se modula de nuevo un láser a la longitud de onda de supervisión. Su salida se inserta a su vez en la fibra de señal y se propaga hasta el amplificador siguiente, donde el proceso es similar.

En los enlaces DWDM punto a punto actuales, el canal de servicio comienza y termina en los extremos inicial y final, respectivamente, del enlace, en unos módulos de control específicos que normalmente se instalan en los mismos bastidores que los transpondedores. Sobre el canal de servicio se suele montar una red de área local Ethernet y su interfaz con el operador es con frecuencia de tipo web.

En el momento en que los enlaces punto a punto se integran como parte de una red todo óptica, los módulos de control de los diferentes canales de servicio deben conectarse al sistema de gestión de la red, con el fin de que éste pueda configurar y controlar los amplificadores, así como recibir de ellos información de estados y alarmas.

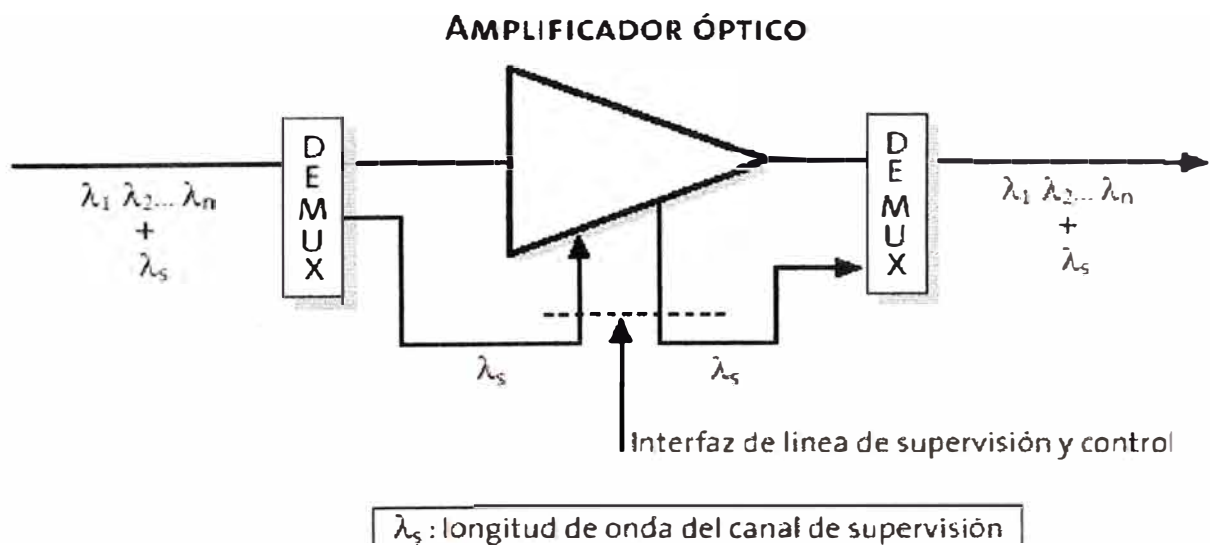


Figura 31. Canal de servicio en una cadena de amplificadores

ANEXO II

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

<i>ADM:</i>	<i>Add Drop Multiplexer.</i> Multiplexor de extracción e inserción
<i>DWDM:</i>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing.</i> Multiplexación densa por división en longitud de onda
<i>GSR:</i>	<i>Gigabit Switch Router.</i> Gigarouter IP <i>Generalized Multiprotocol Label Switching.</i>
<i>GMPLS:</i>	MPLS generalizado
<i>IETF:</i>	<i>Internet Engineering Task Force</i>
<i>MPLS:</i>	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
<i>MPλS:</i>	<i>Multiprotocol Lambda Switching</i>
<i>OADM:</i>	<i>Optical Add-Drop Multiplexer.</i> Filtro, o multiplexor, de extracción e inserción óptica
<i>Och-DP:</i>	<i>Optical Channel - Dedicated Protection.</i> Canal óptico con protección dedicada
<i>OMS-SP:</i>	<i>Optical Multiplex Section - Shared Protection.</i> Sección de multiplexación óptica con protección compartida

<i>OSA:</i>	<i>Optical Spectrum Analysis (Analyzer).</i> Análisis (analizador) de espectro óptico
<i>OXC:</i>	<i>Optical Cross-connect.</i> Matriz de conmutación óptica
<i>PDH:</i>	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy.</i> Jerarquía digital plesiócrona
<i>POS:</i>	<i>Packet over SDH.</i> Paquetes sobre SDH Receptor
<i>SDH:</i>	<i>Synchronous Digital Hierarchy.</i> Jerarquía digital síncrona
<i>TSR:</i>	<i>Terabit Switch Router.</i> Terarouter IP
<i>Tx:</i>	Transmisor

BIBLIOGRAFÍA

1. HARRY J. R. DUTTON: *Understanding Optical Communications*. International Technical Support Organization, Setiembre 1998
2. DAVID LONGLAND: *All Optical Network*. Advanced Network Technologies, Marzo 2000.
3. P. PERRIER Y S. THOMPSON: *Interconectores Ópticos: Lo más novedoso de la red óptica básica*. Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, Agosto 2000.
4. EYTAN MODIANO Y PHILLIP J. LIN : *Traffic Grooming in WDM Networks, Topics in Lightwave Series*. IEEE Communications Magazine, Julio 2001
5. CISCO SYSTEMS, INC: *Introduction to DWDM for Metropolitan Networks*.
6. *Optical Networks for the Rest of Us, Customer Empowered Networking*. NANOG 17 , 1999.
7. FRANCISCO RAMOS PASCUAL: *Redes ópticas transparentes basadas en tecnología DWDM*. Revista CONECtrónica.